



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS DE
PROGÊNIES DE MEIOS-IRMÃOS DE MILHO SUBMETIDOS
AO ESTRESSE SALINO**

CARLA NAYARA DA SILVA LIMA

2025



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E BIODIVERSIDADE**

CARLA NAYARA DA SILVA LIMA

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS DE PROGÊNIES DE MEIOS-
IRMÃOS DE MILHO SUBMETIDOS AO ESTRESSE SALINO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

Orientador
Prof. Dr. Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira.

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL
2025

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

L732a Lima, Carla Nayara da Silva.
Aspectos fisiológicos e morfológicos de progênies de meios-irmãos de milho submetidos ao estresse salino / Carla Nayara da Silva Lima; orientador Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira. – São Cristóvão, SE, 2025.
44 f.: il.

Dissertação (mestrado em Agricultura e Biodiversidade) – Universidade Federal de Sergipe, 2025.

1. Agrobiodiversidade. 2. Solos - Salinidade. 3. Milho. 4. Melhoramento genético. 5. Estresse (Fisiologia). I. Oliveira, Gustavo Hugo Ferreira de, orient.
II. Título.

CDU 633.15

CARLA NAYARA DA SILVA LIMA

ASPECTOS FISIOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS DE PROGÊNIES DE MEIOS-IRMÃOS DE MILHO SUBMETIDOS AO ESTRESSE SALINO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Sergipe, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agricultura e Biodiversidade, área de concentração em Agricultura e Biodiversidade, para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

APROVADA em 03 de julho de 2025.

Dra. Maria Elisa Ayres Guidetti Zagatto Paterniani (IAC)

Dr. Airon José da Silva (UFS)

Prof. Dr. Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira
(Orientador)

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE – BRASIL

Aos agricultores, homens e mulheres do campo, cuja força, sabedoria e resiliência alimentam o mundo, mesmo diante das adversidades impostas pela natureza e pelas limitações sociais e econômicas.

Dedico

AGRADECIMENTOS

“Eu vos louvo e vos dou graças, ó Senhor, porque de modo admirável me formastes”
(Salmo 138(139), 1-3.13-14ab.14c-15).

Ao Senhor, meu Deus, meu eterno agradecimento, por sempre estar ao meu lado e proporcionar maravilhas em minha vida. Sei que, de modo admirável, me formastes.

O final de um ciclo tão importante da minha vida e a realização deste trabalho não seriam possíveis sem a participação e colaboração de pessoas tão essenciais.

Agradeço imensamente:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira, pela orientação, dedicação e pelos ensinamentos transmitidos durante todo o processo deste trabalho. Seu conhecimento, experiência, compreensão e apoio foram fundamentais para minha formação acadêmica e profissional.

Ao professor Dr. Marcos Eric Barbosa Brito, pela coorientação, disponibilidade, paciência e contribuições valiosas. Agradeço pelos ensinamentos, pela compreensão e pelas trocas de conhecimento ao longo da pesquisa.

Ao Grupo de Estudos em Melhoramento Vegetal do Semiárido (GEMS), que me acolheu de maneira inexplicável. Sem a colaboração e a ajuda de vocês, este trabalho não seria possível.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Biodiversidade da Universidade Federal de Sergipe, pelas contribuições, pelo compartilhamento de conhecimentos e pelos momentos de convivência ao longo do mestrado.

À CAPES, pelo apoio financeiro concedido durante o período de pesquisa.

De modo especial, agradeço:

Aos meus pais, Josileide Elias e Carlos Lima, que de forma extraordinária fazem o possível e quase o impossível para que os meus sonhos sejam realizados. Muito obrigada!

A Mateus Alves, meu companheiro de todas as horas, pela paciência, carinho, amor e sabedoria expressados durante todos esses anos. Seu apoio e incentivo foram fundamentais nos dias mais difíceis e para que muitos dos meus, e dos nossos, sonhos fossem realizados.

Aos meus irmãos, Carlos André Lima e Ane Caroline Lima, por serem os melhores irmãos e por estarem comigo em todos os momentos da minha vida, sempre me apoiando e fortalecendo.

Aos meus avós, que sempre acreditaram no meu potencial e me incentivaram a ir em busca dos meus objetivos.

Aos meus afilhados Bianca, Wenderson, Erick, Elisa, Nathan e Miguel, que mesmo tão pequenos são grandes motivos que me fortalecem e iluminam os meus dias. Espero, um dia, poder ser referência na vida de vocês.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Efeitos do Estresse Salino nas Plantas	2
2.2 Fisiologia do Milho Sob Estresse Salino	3
2.3 Morfologia do Milho Sob Estresse Salino	4
2.4 Variabilidade Genética e Seleção de Progenies Tolerantes à Salinidade em Milho	4
2.5 Métodos de Avaliação da Tolerância ao Estresse Salino	5
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
4. ARTIGO 1	12
4.1. Introdução	12
4.2. Material e Métodos	13
4.2.1. <i>Material genético e delineamento experimental</i>	13
4.2.2. <i>Instalação do experimento e manejo</i>	14
4.2.3. <i>Características avaliadas</i>	14
4.2.4. <i>Análises estatísticas</i>	15
4.3. Resultados	16
4.3.1 <i>Análise de variância</i>	16
4.3.2 <i>Análise de Componentes Principais (PCA)</i>	20
4.3.3 <i>Seleção de genótipos por meio do índice MGIDI</i>	21
4.4. Discussão	23
4.5. Conclusões	24
4.6. Referências Bibliográficas	27
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	32

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

- Figura 1** - Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) com as variáveis morfológicas e fisiológicas de maior contribuição, evidenciando a distribuição dos genótipos de milho sob diferentes concentrações de sais.21
- Figura 2** - Índice MGIDI dos genótipos de milho avaliados sob diferentes concentrações de sais.22
- Figura 3** - Contribuição relativa dos fatores FA1 (biomassa) e FA2 (TRA) para o valor total do índice MGIDI dos genótipos selecionados.23

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1 - Características avaliadas em 21 genótipos de milho: códigos, descrições, unidades e objetivos de seleção.	15
Tabela 2 - Resumo da análise de variância (ANOVA) relativa às características físico-químicas da umidade (UMI) (g g^{-1}), potencial de hidrogênio (pH) do extrato de suspensão, 1:2,5, e condutividade elétrica (CE) (dS m^{-1}) do extrato de suspensão, 1:2,5, do substrato após o período experimental de cultivo do milho até o estágio V8.	16
Tabela 3 - Comparação de médias relativa às características físico-químicas da umidade (UMI) (% peso); potencial de hidrogênio (pH) do extrato de suspensão 1:2,5 e condutividade elétrica (CE) (dS m^{-1}) do extrato de suspensão 1:2,5 do substrato após o período experimental de cultivo do milho até o estágio V8.	16
Tabela 4 - Comparação de médias do teor relativo de água (TRA, %) dos genótipos de milho avaliado no estágio fenológico V6, sob duas concentrações de sais ($C1 = 0,14 \text{ dS m}^{-1}$ e $C2 = 3,0 \text{ dS m}^{-1}$).	17
Tabela 5 - Comparação de médias dos genótipos relativa às características fisiológicas de análise de solo e desenvolvimento de plantas (SPAD); clorofila total (TOTCH, $\mu\text{g cm}^{-2}$); eficiência quântica máxima do fotossistema II (FV/FM), avaliado no estágio fenológico V4 do milho; e extravasamento de eletrólitos (EE, %), avaliado no estágio V6.	18
Tabela 6 - Comparação de médias dos genótipos para características morfológicas avaliadas no estágio V8 do milho, dentro de cada concentração de sais ($C1 = 0,14 \text{ dS m}^{-1}$ e $C2 = 3,0 \text{ m}^{-1}$): massa fresca da folha (MF_F_C1 e MF_F_C2); massa seca da folha (MS_F_C1 e MS_F_C2); massa fresca do colmo (MF_C_C1 e MF_C_C2); massa seca do colmo (MS_C_C1 e MS_C_C2).	19
Tabela 7 - Comparação de médias dos genótipos para características morfológicas avaliadas no estágio V8 do milho, dentro de cada concentração de sais ($C1 = 0,14 \text{ dS m}^{-1}$ e $C2 = 3,0 \text{ m}^{-1}$): massa fresca da raiz (MF_R_C1 e MF_R_C2); Massa seca da raiz (MS_R_C1 e MS_R_C2).	20

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ALT_V4	Altura da planta no estágio fenológico V4
ALT_V6	Altura da planta no estágio fenológico V6
ANOVA	Análise de Variância
CAT	Catalise
CE	Condutividade Elétrica
CV	Coefficiente de Variação
DC	Diâmetro do colmo
DNA	Ácido desoxirribonucleico
dS m ⁻¹	Deci-siemens por metro
EE	Extravasamento de eletrólito
EROs	Espécies Reativas de Oxigênio
F ₀	Florescência inicial
FA1	Fator 1
FA2	Fator 2
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
F _m	Florescência máxima
FMO	Número de folhas mortas
F _v	Florescência variável
F _v /F _m	Eficiência quântica máxima do fotossistema II
FVI	Número de folhas vivas
MF_C	Massa fresca do colmo
MF_F	Massa fresca da folha
MF_R	Massa fresca da raiz
MGIDI	Índice de Distância Genótipo-Ideótipo Multitraço
MS_C	Massa seca do colmo
MS_F	Massa seca da folha
MS_R	Massa seca da raiz
PCA	Análise de Componentes Principais
pH	Potencial de hidrogênio
PMI	População de meios-irmãos
POD	Peroxidases
IAC PopTol 2	População Tolerante 2
PSII	Fotossistema II
SOD	Superóxido Dismutase
SPAD	Soil Plant Analysis Development
TOTCH	Clorofila total
TRA	Teor Relativo de Água
UMI	Umidade

RESUMO

LIMA, Carla Nayara da Silva. **Aspectos Fisiológicos e Morfológicos de Progênes de Meios-Irmãos de Milho Submetidos ao Estresse Salino**. São Cristóvão: UFS, 2025. 44p. (Dissertação – Mestrado em Agricultura e Biodiversidade).*

A salinização dos solos é um dos principais fatores limitantes da agricultura, especialmente em regiões semiáridas, onde práticas inadequadas de irrigação e manejo agravam o acúmulo de sais no solo. O milho (*Zea mays* L.), cultura de grande importância socioeconômica no Brasil e no mundo, apresenta sensibilidade moderada à salinidade, o que compromete seu desenvolvimento e produtividade em áreas afetadas. Diante disso, a identificação e seleção de genótipos tolerantes surge como estratégia para o cultivo em áreas salinizadas. Assim, objetivou-se avaliar o desempenho morfofisiológico de progênes de meios-irmãos de milho submetidas ao estresse salino na fase juvenil e selecionar os genótipos mais promissores por meio de ferramentas estatísticas multivariadas. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando delineamento em blocos casualizados com esquema fatorial 21 (genótipos) x 2 (níveis de salinidade), com três repetições. Foram avaliadas 20 progênes de meios-irmãos e um híbrido comercial (GNZ-7788) como testemunha, em duas concentrações de sais: 0,14 dS m⁻¹ e 3,0 dS m⁻¹. As variáveis avaliadas incluíram altura de planta nos estádios fenológicos V3 e V6 (ALT_V3 e ALT_V6), número de folhas vivas e mortas (FVI e FMO), biomassa das folhas, colmo e raízes (MF_F, MF_C, MF_R, MS_F, MS_C e MS_R), teor relativo de água (TRA), fluorescência da clorofila *a* (Fo, Fm, Fv e Fv/Fm), índice SPAD, clorofila total (TOTCH) e extravasamento de eletrólitos (EE). As análises estatísticas compreenderam a Análise de Variância (ANOVA), Análise de Componentes Principais (PCA) e o índice MGIDI (Multi-Trait Genotype-Ideotype Distance Index), visando à seleção simultânea de genótipos com base em múltiplas características. Os resultados revelaram efeitos significativos da salinidade sobre a maioria das variáveis, com destaque para a redução de biomassa e alterações na eficiência fisiológica sob estresse. A interação genótipos × salinidade foi significativa para a biomassa da folha, colmo e raízes e o TRA, indicando variabilidade genética entre os genótipos quanto à resposta ao estresse salino. Os genótipos G2 e G6 destacaram-se por manter elevados níveis de biomassa, teor relativo de água e integridade de membranas sob estresse, evidenciando maior estabilidade morfofisiológica. A PCA e o MGIDI permitiram a identificação de dois componentes principais associados à produção de biomassa (FA1) e à manutenção hídrica (FA2). Ambas as ferramentas foram eficazes na diferenciação e seleção dos genótipos superiores. Conclui-se que a integração de dados morfofisiológicos com análises multivariadas constitui uma estratégia eficiente para a seleção precoce de genótipos de milho tolerantes à salinidade. As progênes G2 e G6 demonstraram potencial promissor para o uso em programas de melhoramento genético voltados à adaptação em regiões semiáridas afetadas por sais.

Palavras-chave: Estresse abiótico, melhoramento genético, tolerância à salinidade, seleção multivariada, *Zea mays*.

* Comitê Orientador: Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira – UFS (Orientador), Marcos Eric Barbosa Brito – UFS (Coorientador).

ABSTRACT

LIMA, Carla Nayara da Silva. **Physiological and Morphological Responses of Maize Half-Sib Progenies to Salt Stress**. São Cristóvão: UFS, 2025. 44p. (Dissertation – Master of Science in Agriculture and Biodiversity).*

Soil salinization is one of the main limiting factors for agriculture, particularly in semi-arid regions, where inadequate irrigation and management practices exacerbate salt accumulation in the soil. Maize (*Zea mays* L.), a crop of great socioeconomic importance in Brazil and worldwide, exhibits moderate sensitivity to salinity, which adversely affects its growth and productivity in salt-affected areas. In this context, the identification and selection of salt-tolerant genotypes is a key strategy for cultivation under saline conditions. Therefore, the objective of this study is to evaluate the morphophysiological performance of half-sib maize progenies under salt stress during the juvenile phase, and to identify the most promising genotypes using multivariate statistical tools. The experiment was conducted in a greenhouse using a randomized block design in a 21 (genotypes) \times 2 (salinity levels) factorial arrangement, with three replications. Twenty half-sib progenies and one commercial hybrid (GNZ-7788) used as a check were evaluated under two salt concentrations: 0.14 dS m⁻¹ and 3.0 dS m⁻¹. The measured variables included plant height at the V3 and V6 stages (ALT_V3 and ALT_V6), number of live and dead leaves (FVI and FMO), biomass of fresh and dry leaves, stem, and roots (MF_F, MF_C, MF_R, MS_F, MS_C, and MS_R), relative water content (RWC), chlorophyll *a* fluorescence parameters (Fo, Fm, Fv, and Fv/Fm), SPAD index, total chlorophyll content (TOTCH), and electrolyte leakage (EL). The data were subjected to Analysis of Variance (ANOVA), Principal Component Analysis (PCA), and the Multi-Trait Genotype-Ideotype Distance Index (MGIDI) to enable the simultaneous selection of genotypes based on multiple traits. Results showed significant effects of salinity on most variables, notably reductions in biomass and changes in physiological efficiency under stress. The genotype \times salinity interaction was significant for leaf, stem, and root biomass, as well as for RWC, indicating genetic variability among genotypes in their response to salt stress. Genotypes G2 and G6 stood out by maintaining high biomass levels, higher relative water content, and membrane integrity under salinity, demonstrating greater morphophysiological stability. PCA and MGIDI identified two main components associated with biomass production (FA1) and water retention capacity (FA2). Both tools were effective in distinguishing and selecting superior genotypes. We conclude that integrating morphophysiological data with multivariate analyses is an efficient strategy for the early selection of salt-tolerant maize genotypes. Progenies G2 and G6 showed promising potential for use in breeding programs aimed at improving adaptation to salt-affected semi-arid environments.

Key-words: Abiotic stress, genetic improvement, multivariate selection, salinity tolerance, *Zea mays*.

* Guidance Committee: Gustavo Hugo Ferreira de Oliveira – UFS (Advisor), Marcos Eric Barbosa Brito – UFS (Adjunct advisor).

1. INTRODUÇÃO GERAL

O aumento da demanda global por alimentos impõe à agricultura o desafio de manter a produtividade em ambientes cada vez mais adversos. Entre os estresses abióticos, a salinidade do solo é um dos principais fatores limitantes à produção vegetal, especialmente em regiões áridas, semiáridas e irrigadas de forma inadequada (Soares Filho *et al.*, 2016; Araújo *et al.*, 2024). Estima-se que mais de 20% das terras agrícolas do mundo estejam afetadas por sais, com tendência de agravamento em decorrência das mudanças climáticas e da intensificação agrícola (AbdElgawad *et al.*, 2016; Moukhtari *et al.*, 2020).

No Brasil, o semiárido nordestino concentra grande parte dos solos suscetíveis à salinização. No estado de Sergipe, cuja área semiárida abrange cerca de 48% do território (INSA, 2024), o uso de águas salinas na irrigação, associado à baixa capacidade de troca catiônica dos solos e às elevadas taxas de evapotranspiração, agrava o acúmulo de sais no perfil do solo (Ferreira *et al.*, 2016; Costa, 2024). Esse cenário compromete a sustentabilidade agrícola e exige o desenvolvimento de tecnologias que permitam manter a produtividade em condições de estresse.

O milho (*Zea mays* L.), cultura de ampla importância alimentar, forrageira e energética, destaca-se como o grão mais produzido no estado de Sergipe, com mais de 874 mil toneladas em 2023, sendo o sertão responsável por mais de 55% desse total (IBGE, 2023). Apesar da sua relevância socioeconômica, o milho é moderadamente sensível ao estresse salino, apresentando limites de tolerância em torno de 1,1 dS m⁻¹ na água de irrigação e 1,7 dS m⁻¹ para a condutividade elétrica do solo, valores frequentemente superados em áreas do semiárido (Gomes *et al.*, 2011).

A salinidade impõe uma série de restrições ao crescimento vegetal, provocando estresse osmótico, toxicidade iônica, desbalanço nutricional e estresse oxidativo (Atta *et al.*, 2023). Esses efeitos comprometem funções fisiológicas críticas como a absorção de água, fotossíntese, integridade de membranas e eficiência do fotossistema II (Vennam *et al.*, 2024). Assim, a tolerância à salinidade é um caráter complexo, de natureza quantitativa, controlado por múltiplos genes, e fortemente influenciado pela interação genótipo × ambiente (Soares Filho *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, o desenvolvimento de genótipos adaptados a ambientes salinos, especialmente em suas fases iniciais de crescimento, representa uma estratégia promissora para mitigar os efeitos do estresse e promover a sustentabilidade agrícola. Nesse contexto, o uso de progênies de meios-irmãos em programas de seleção recorrente tem se mostrado eficaz por permitir a exploração da variabilidade genética e a identificação de indivíduos superiores ao longo de sucessivos ciclos de recombinação (Borém *et al.*, 2021; Paterniani *et al.*, 2019).

A avaliação simultânea de múltiplos caracteres morfofisiológicos, por meio de abordagens estatísticas multivariadas, como a Análise de Componentes Principais (PCA) e o índice MGIDI (Multi-Trait Genotype-Ideotype Distance Index), permite uma seleção mais robusta, evitando decisões baseadas em variáveis isoladas (Olivoto & Nardino, 2021). Essa abordagem integrada favorece a identificação de genótipos com maior eficiência morfofisiológica sob condições salinas.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade morfofisiológica de progênies de meios-irmãos de milho submetidas a condições de estresse salino e selecionar genótipos superiores mediante a aplicação de índices multivariados, contribuindo para o avanço de programas de melhoramento voltados à salinidade em regiões semiáridas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Efeitos do Estresse Salino nas Plantas

O estresse salino representa uma das principais limitações à produtividade agrícola em ambientes áridos, semiáridos e irrigados inadequadamente (Soares Filho *et al.*, 2016; Araújo *et al.*, 2024). Estima-se que mais de 20% das terras agrícolas no mundo estejam afetadas pela salinidade, fenômeno intensificado pela elevação das taxas de evapotranspiração, uso de água salina para irrigação e práticas agrícolas inadequadas (AbdElgawad *et al.*, 2016; Moukhtari *et al.*, 2020).

A correta caracterização da salinidade do solo e da água é essencial para o diagnóstico e manejo de áreas afetadas. De acordo com os critérios clássicos propostos por Richards (1954), os solos são classificados como salinos quando a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) é superior a 4 dS m^{-1} , o pH permanece abaixo de 8,5, a porcentagem de sódio trocável (PST) é inferior a 15% e a razão de adsorção de sódio (RAS) é menor que 13 (Costa, 2024). Solos com CEes entre 2 e 4 dS m^{-1} são classificados como ligeiramente salinos, condição na qual já podem ocorrer reduções no rendimento de culturas sensíveis (Abrol *et al.*, 1988; Soares Filho *et al.*, 2016).

Quanto à qualidade da água de irrigação, o risco de salinização do solo é considerado médio quando a condutividade elétrica varia entre 0,7 e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, sendo alto quando os valores ultrapassam $3,0 \text{ dS m}^{-1}$. No entanto, águas com CE abaixo desses limites ainda podem comprometer o desenvolvimento de culturas sensíveis e moderadamente sensíveis, especialmente em solos com baixa capacidade de troca catiônica e sob condições de evaporação intensa (Ayers & Westcot, 1994; Holanda *et al.*, 2016).

Os efeitos do estresse salino nas plantas decorrem, principalmente, de dois componentes: o estresse osmótico e a toxicidade iônica. O primeiro decorre da diminuição do potencial osmótico do solo, dificultando a absorção de água pelas raízes e provocando uma condição de “seca fisiológica”. O segundo resulta do acúmulo excessivo de íons tóxicos, principalmente sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-), que podem afetar processos metabólicos essenciais e comprometer a integridade celular (Dias *et al.*, 2016; Shahid *et al.*, 2020).

O estresse osmótico é a primeira resposta das plantas quando expostas à salinidade, desencadeado pela elevada concentração de sais na solução do solo, que reduz seu potencial osmótico e dificulta a absorção de água pelas raízes. Essa condição prejudica o gradiente hídrico entre o solo e o sistema radicular, restringindo o fluxo de água para os tecidos vegetais e limitando a hidratação celular, mesmo na presença de umidade do solo (Dias *et al.*, 2016; Costa, 2024).

Como forma de adaptação, muitas espécies ativam mecanismos de ajuste osmótico, promovendo o acúmulo de solutos compatíveis, como prolina, glicina-betaína e açúcares solúveis. Esses compostos contribuem para a manutenção da absorção de água sem interferir nas funções metabólicas (Zhang *et al.*, 2025). A eficiência desses mecanismos varia entre genótipos e está diretamente associada à sua capacidade de tolerar o estresse salino.

Além disso, a salinidade induz estresse oxidativo devido ao aumento da geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), como peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e ânion superóxido (O_2^-), que promovem danos às proteínas, lipídios e ao DNA, resultando na perda de funcionalidade celular e, conseqüentemente, na redução do crescimento e da produtividade das plantas (Guan *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020).

Outro aspecto frequentemente negligenciado, mas de grande importância, é o impacto da salinidade sobre a microbiota rizosférica. A salinidade altera a composição e diversidade microbiana do solo, reduzindo a presença de microrganismos benéficos, como bactérias promotoras de crescimento vegetal (Orozco-Mosqueda *et al.*, 2020; Bryla *et al.*, 2021). Essa disfunção compromete o crescimento, a absorção de nutrientes e o balanço hormonal, bem como o desenvolvimento das plantas hospedeiras (Ma *et al.*, 2020). Estratégias baseadas na

utilização de microrganismos têm sido estudadas como alternativa mitigadora do estresse salino (Shrivastava e Kumar, 2014; Orozco-Mosqueda *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

As plantas desenvolveram diversos mecanismos adaptativos para lidar com o estresse salino, como a exclusão ou compartimentalização de íons tóxicos, a síntese de solutos compatíveis, o ajuste osmótico e a ativação de sistemas antioxidantes, além de alterações morfológicas e fisiológicas que visam minimizar os danos causados pelo excesso de sais (Zhang *et al.*, 2025).

Na prática agrícola, o estresse salino raramente ocorre de forma isolada. Ele frequentemente se combina com outros estresses, como déficit hídrico e altas temperaturas, o que impõe desafios adicionais à fisiologia vegetal. A resposta das plantas ao estresse combinado é muitas vezes distinta da resposta isolada, exigindo abordagens integradas para avaliação de genótipos em programas de melhoramento (Cao *et al.*, 2023).

2.2 Fisiologia do Milho Sob Estresse Salino

O milho (*Zea mays* L.), por ser uma espécie glicófita, apresenta sensibilidade moderada ao estresse salino, o que compromete diretamente processos fisiológicos essenciais, especialmente a fotossíntese (Fernandes *et al.*, 2016; Van Zelm *et al.*, 2020). Um dos principais efeitos observados é a limitação estomática, decorrente do fechamento dos estômatos como mecanismo de contenção de perda de água. Essa limitação reduz a entrada de CO₂, afetando a taxa fotossintética. Simultaneamente, ocorrem danos aos pigmentos fotossintéticos e às proteínas dos complexos proteicos dos tilacoides, intensificando os prejuízos à máquina fotossintética (Freire *et al.*, 2016; Vennam *et al.*, 2024).

A salinidade também compromete a eficiência fotoquímica da fotossíntese, mensurada por meio da fluorescência da clorofila, sendo que condutividades elétricas superiores a 3 dS m⁻¹ já são suficientes para comprometer o processo fotossintético e, conseqüentemente, reduzir a produtividade (Vennam *et al.*, 2024). A degradação dos pigmentos fotossintéticos, observada por meio da redução do índice SPAD e da clorofila total (TOTCH), também evidencia o impacto do estresse salino na fotossíntese, funcionando como indicativo precoce de danos fisiológicos (Alves *et al.*, 2022).

Além disso, o estresse salino leva à formação excessiva de espécies reativas de oxigênio (EROs), que, em concentrações elevadas, promovem peroxidação lipídica, alterações de permeabilidade das membranas, danos estruturais aos cloroplastos e inativação enzimática (Atta *et al.*, 2023). Uma forma sensível de quantificar os danos celulares causados por EROs é a análise do extravasamento de eletrólitos (EE), que reflete a perda de integridade das membranas plasmáticas. Valores elevados de EE indicam maior lesão celular, sendo, portanto, uma variável fisiológica crítica na avaliação de genótipos sob salinidade (AbdElgawad *et al.*, 2016; Hafez *et al.*, 2021).

Para mitigar esses efeitos, o milho ativa sistemas de defesa antioxidantes, incluindo enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POD), além da síntese de solutos osmoprotetores, como prolina e açúcares solúveis (Guan *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020; Zuffo *et al.*, 2023). A eficiência desses mecanismos está diretamente relacionada à capacidade de tolerância da planta frente ao estresse salino.

Dentre os mecanismos osmóticos, destaca-se o acúmulo de solutos compatíveis, como prolina e glicina-betaína. Esses compostos atuam na manutenção do potencial osmótico celular, estabilização de proteínas e membranas, além de participarem na eliminação de EROs (Guan *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020). A prolina, em especial, contribui para o ajuste osmótico e preserva a integridade estrutural das membranas sob condições salinas. Estratégias adaptativas como compartimentalização de íons nos vacúolos, presença de glândulas excretoras de sal e o acúmulo conjunto de solutos no citosol também são consideradas indicadores fisiológicos de tolerância à salinidade (Soares Filho *et al.*, 2016).

A toxicidade iônica representa outro componente crítico do estresse salino, sobretudo devido ao acúmulo excessivo de íons sódio (Na⁺) e cloreto (Cl⁻) na rizosfera. Esses íons

competem com nutrientes essenciais, como o potássio (K^+), provocando desequilíbrios nutricionais, distúrbios metabólicos e redução do potencial osmótico da solução do solo, culminando na chamada “seca fisiológica” (Shahid *et al.*, 2020).

Essa condição restringe a absorção de água pelas raízes, refletindo diretamente na hidratação dos tecidos vegetais. Como consequência, observa-se a redução do teor relativo de água nas folhas (TRA), parâmetro fisiológico que expressa o status hídrico da planta e sua capacidade de manter a turgência celular mesmo sob condições adversas (Hafez *et al.*, 2021).

O balanço iônico, especialmente a razão K^+/Na^+ , é determinante para a manutenção da homeostase celular, uma vez que o potássio é fundamental para a ativação de enzimas, regulação enzimática e integridade das membranas plasmáticas (AbdElgawad *et al.*, 2016).

2.3 Morfologia do Milho Sob Estresse Salino

As características morfológicas do milho são afetadas significativamente pela salinidade, resultando na redução do crescimento vegetativo e no comprometimento da produtividade. Os principais efeitos incluem diminuição da massa fresca e seca das plantas, redução do diâmetro do colmo, altura da planta e número de folhas vivas (Freire *et al.*, 2016).

Além disso, estudos demonstram que o estresse salino prejudica a germinação, a sobrevivência e as características morfofisiológicas do milho, promovendo danos foliares evidentes, como murchamento, alteração no aspecto visual e o aparecimento de pontuações acinzentadas (Zahra *et al.*, 2020; Zia *et al.*, 2022; Zuffo *et al.*, 2023). Os autores salientaram ainda que níveis altos de salinidade podem danificar as estruturas celulares, afetando a morfologia foliar ao reduzir a área foliar, promover espessamento das folhas e induzir sintomas visuais como clorose e necrose. Tais alterações impactam negativamente a capacidade fotossintética e o desenvolvimento geral da planta.

Outro impacto relevante da salinidade é observado no sistema radicular, principalmente por tratar-se dos órgãos da planta de primeiro contato com o sal no solo. Embora estejam na linha de frente da exposição, as raízes não necessariamente demonstram maior sensibilidade que a parte aérea (Vennam *et al.*, 2024). Esses autores salientam ainda que alguns híbridos de milho demonstram notável plasticidade das raízes diante da salinidade, apresentando estratégias adaptativas como o alongamento seletivo e a alteração da razão raiz/parte aérea, indicando uma realocação metabólica em favor do sistema radicular.

A remodelação da arquitetura do sistema radicular representa uma resposta ativa da planta à salinidade, mediada por vias hormonais e processos moleculares específicos. Segundo Van Zelm *et al.* (2020), o estresse salino reduz o crescimento radicular inicial, promovendo uma fase temporária de quiescência, com recuperação parcial posteriormente. A duração dessa pausa no crescimento é regulada por hormônios como o ácido abscísico (ABA), jasmonatos (JA) e auxinas, que coordenam o equilíbrio entre inibição e retomada do crescimento, especialmente em raízes laterais.

2.4 Variabilidade Genética e Seleção de Progênes Tolerantes à Salinidade em Milho

A tolerância das plantas ao estresse salino depende do desenvolvimento de estratégias adaptativas em propriedades morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, permitindo mitigar os efeitos causados pela salinidade (Munns e Tester, 2008; Zhang *et al.*, 2020). Em milho, a tolerância ao sal constitui um caráter quantitativo, de natureza complexa e poligênica, fortemente influenciado pela interação genótipo x ambiente ($G \times E$) (Soares Filho *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025).

Frente a essa complexidade, o uso de população segregantes derivadas de cruzamentos, como as progênes de meios-irmãos, constitui uma estratégia eficiente em programas de melhoramento. Essas progênes permitem a exploração da variabilidade genética intra e interpopulacional, facilitando a seleção de indivíduos superiores ao longo de ciclos sucessivos (Borém *et al.*, 2021). O uso de progênes de meios-irmãos é particularmente comum em programas de seleção recorrente, método que visa o acúmulo progressivo de alelos favoráveis

por meio da recombinação de indivíduos superiores a cada ciclo de seleção (Paterniani *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a adoção de índices de seleção, como o Multi-Trait Genotype-Ideotype Distance Index (MGIDI), tem se destacado por permitir a avaliação simultânea de múltiplos caracteres morfológicos e fisiológicos. Essa abordagem favorece uma seleção mais robusta de genótipos com desempenho superior sob estresse salino, ao considerar a distância entre o genótipo avaliado e um ideótipo teórico desejável (Olivoto e Nardino, 2021).

Além disso, o avanço em biotecnologia tem permitido o uso de ferramentas genômicas no melhoramento para tolerância ao sal. Estudos de associação genômica ampla (GWAS), mapeamento de QTLs e seleção genômica têm sido utilizados para identificar regiões do genoma associadas a características de interesse, como o acúmulo de Na^+ , razão K^+/Na^+ , atividade antioxidante e manutenção do potencial osmótico (Zhang *et al.*, 2020; Atta *et al.*, 2023). Genes como *HKT1*, *NHX1* e os pertencentes ao sistema *SOS* (Salt Overly Sensitive) têm sido apontados como alvos promissores em programas de melhoramento molecular (Zhang *et al.*, 2020; Atta *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2025).

A expressão diferencial de fatores de transcrição, como *DREB*, *WRKY*, *MYB* e *NAC*, também desempenha papel fundamental na regulação da resposta ao estresse osmótico e iônico, representando um mecanismo-chave de regulação gênica em milho sob estresse salino. O avanço no conhecimento funcional desses elementos regulatórios contribui para a identificação de genótipos com melhor capacidade adaptativa e para o desenvolvimento de marcadores moleculares aplicáveis à seleção assistida (Zhang *et al.*, 2025).

Programas de melhoramento têm obtido êxito na identificação de genótipos de milho com maior tolerância à salinidade, utilizando avaliações fenotípicas, moleculares e bioquímicas. No entanto, a ampla adoção de cultivares tolerantes ainda depende do avanço nas técnicas de fenotipagem de alta precisão e da integração de abordagens genômicas (Zhang *et al.*, 2020; Masuda *et al.*, 2021).

2.5 Métodos de Avaliação da Tolerância ao Estresse Salino

A avaliação da tolerância à salinidade em milho envolve a análise de parâmetros morfofisiológicos, como condutividade elétrica, teor relativo de água, florescência e teor de clorofila, além da produção de biomassa vegetal.

Os dados de condutividade elétrica do extrato de saturação do solo são indicativos do nível de salinidade a que as plantas estão expostas, e a produção de biomassa permite avaliar o impacto do estresse no desempenho fisiológico e no crescimento vegetal (Ribeiro *et al.*, 2016; Dias *et al.*, 2016).

O extravasamento de eletrólitos é uma técnica amplamente utilizada para verificar os danos à membrana celular causados pelo estresse salino, permitindo identificar o vazamento de íons como Na^+ e K^+ . A integridade das membranas plasmáticas é essencial para o funcionamento celular, sendo frequentemente comprometida pelo estresse oxidativo induzido pela salinidade (Zahra *et al.*, 2020).

A fluorescência da clorofila, por sua vez, é uma ferramenta não destrutiva que avalia a eficiência fotoquímica do fotossistema II, sendo útil na detecção precoce de danos provocados pelo estresse salino (Wang *et al.*, 2018; Gomes do Ó *et al.*, 2021). A determinação do teor de prolina também é empregada como indicador fisiológico da capacidade adaptativa das plantas ao estresse osmótico (Sabagh *et al.*, 2021).

A condução de experimentos sob condições controladas em casa de vegetação permite a padronização dos níveis de salinidade e minimiza a interferência de variáveis ambientais, favorecendo a avaliação precisa da tolerância. No entanto, ensaios de validação em campo são essenciais para verificar a estabilidade e a eficácia das respostas dos genótipos frente à variabilidade ambiental natural, assegurando maior aplicabilidade dos resultados obtidos.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELGAWAD, H.; ZINTA, G.; HEGAB, M.M.; PANDEY, R.; ASARD, H.; ABUELSOUD, W. High salinity induces different oxidative stress and antioxidant responses in maize seedlings organs. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 179763, 2016. DOI [10.3389/fpls.2016.00276](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00276). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2016.00276/full>. Acesso em: 05 abril de 2025.

ABROL, I. P.; YADAV, J. S. P.; MASSOUD, F. I. Salt-affected soils and their management. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome, 1988. Disponível em: <https://www.fao.org/4/x5871e/x5871e00.htm#Contents>. Acesso em: 06 julho de 2025.

ALVES, R.M.; SILVA, M. A. D.; SILVA, E. F.; HERMÍNIO, P. J.; GOMES-JUNIOR, F. G. Oxidative damage associated with salt stress during germination and initial development of purple corn seedlings. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 44, p. e55760, 2022. DOI 10.4025/actasciagron.v44i1.55760. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/j9j3CM3DNxfqCbfbVpvr7rn/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 14 junho 2025.

ARAÚJO, K. C. T. de; SANTOS, W. M. dos; GONZAGA, M. I. S.; SILVA, A. N. C. da; SOBRAL, L. F. Biochar improved soil salinity, mitigated sodium toxicity, and improved plant growth in salt-affected soils. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 12, p. e95131247723-e95131247723, 2024. DOI [10.33448/rsd-v13i12.47723](https://doi.org/10.33448/rsd-v13i12.47723). Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/47723>. Acesso em: 03 abril de 2025.

ATTA, K. *et al.* Impacts of salinity stress on crop plants: Improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1241736, 2023. DOI [10.3389/fpls.2023.1241736](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1241736/full#T1>. Acesso em: 15 maio de 2025.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. Water quality for agriculture. **Food and agriculture organization of the United Nations**. Rome, 1994. Disponível em: <https://www.fao.org/4/t0234e/T0234E00.htm#TOC>. Acesso em: 05 julho de 2025.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de plantas**. 8ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2021. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=IX5ZEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT13&dq=Melhoramento+de+plantas+Alu%C3%ADzio+Bor%C3%A9m,+Glauco+Vieira+Miranda,+Roberto+Fritsche-Neto.--+8.ed.--+S%C3%A3o+Paulo:+Oficina+de+Textos,+2021.&ots=git3oFYWqX&sig=pO8HCQIhx7y0MRkYRndydFBjBvY#v=onepage&q=Melhoramento%20de%20plantas%20%2F%20Alu%C3%ADzio%20Bor%C3%A9m%2C%20Glauco%20Vieira%20Miranda%2C%20Roberto%20Fritsche-Neto.%20--%208.%20ed.%20--%20S%C3%A3o%20Paulo%20%3A%20Oficina%20de%20Textos%2C%202021.&f=false>. Acesso em: 15 maio de 2025.

BRYLA, D. R.; SCAGEL, C. F.; LUKAS, S. B.; SULLIVAN, D. M. Ion-specific limitations of sodium chloride and calcium chloride on growth, nutrient uptake, and mycorrhizal colonization in northern and southern highbush blueberry. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 146, n. 6, p. 399-410, 2021. DOI 10.21273/JASHS05084-21. Disponível em: <https://journals.ashs.org/jashes/view/journals/jashes/146/6/article-p399.xml>. Acesso em: 14 junho de 2025.

CAO, H. *et al.* Drought, salt, and combined stresses in plants: Effects, tolerance mechanisms, and strategies. **Advances in Agronomy**, v. 178, p. 107-163, 2023. DOI [10.1016/bs.agron.2022.11.004](https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.11.004). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211322001110>. Acesso em: 04 junho de 2025.

COSTA, M. M. M. N. Documentos 298: Salinidade do solo. Campina Grande – PB. **Embrapa Algodão**, 2024. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1174794/1/DOCUMENTOS-MAGNA-298.pdf>. Acesso em: 05 julho de 2025.

DIAS, N. da S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R. de; FERREIRA, J. F. da S.; SOUSA NETO, O. N. de; QUEIROZ, Í. S. R. de. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados. Fortaleza, INCTSal, p. 151-162, 2016. Disponível em: https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20361500/pdf_pubs/P2542.pdf. Acesso em: 14 abril de 2025.

FERNANDES, P. D.; BRITO, M. E. B.; GHAYI, H. R.; ANDRADE, A. P. de; MEDEIROS, S. de S. Halofitismo e agricultura bioassalina. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, p. 209 - 242, 2016. Disponível em: <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 05 abril de 2025.

FERREIRA, P.A.; SILVA, J. B. L.; RUIZ, H. A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, p. 259 – 274, 2016. Disponível em: <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 05 abril de 2024.

FREIRE, J. L. de O.; CAVALCANTE, L. F.; DANTAS, M. M. M.; SILVA, A. G. da; HENRIQUES, J. da S.; ZUZA, J. F.C. Estresse salino e uso de biofertilizantes como mitigadores dos sais nos componentes morfofisiológicos e de produção de glicófitas. **Revista Principia**, n. 29, p. 30-38, 2016. DOI [10.18265/1517-03062015v1n29p29-38](https://doi.org/10.18265/1517-03062015v1n29p29-38). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304069699_Estresse_salino_e_uso_de_biofertilizantes_como_mitigadores_dos_sais_nos_componentes_morfofisiologicos_e_de_producao_de_glicofitas. Acesso em: 05 abril de 2025.

GOMES DO Ó, L. M.; COVA, A. M. W.; SILVA, P. C. C.; GHEYI, H. R., AZEVEDO NETO, A. D. de; RIBAS, R. F. Aspectos bioquímicos e fluorescência da clorofila a em plantas de minimelancia hidropônica sob estresse salino. **Irriga**, v. 26, n. 2, p. 221-239, 2021. DOI [10.15809/irriga.2021v26n2p221-239](https://doi.org/10.15809/irriga.2021v26n2p221-239). Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4344/2949>. Acesso em: 14 maio de 2025.

GOMES, Krishna R.; AMORIM, Aiala V.; FERREIRA, Francisco J.; FILHO, Francisco L. A.; LACERDA, Claudivan F.; GOMES-FILHO, Enéas. Respostas de crescimento e fisiologia do milho submetido a estresse salino com diferentes espaçamentos de cultivo. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, p. 365-370, 2011. DOI [10.1590/S1415-43662011000400006](https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400006). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/GBBZLg4DxvS8FKSxs4xpKJK/?lang=pt>. Acesso em: 19 abril de 2024.

GUAN, C.; HUANG, Y.-H.; CUI, X.; LIU, S.-J.; ZHOU, Y.-Z.; ZHANG, Y.-W. Superexpressão do gene que codifica a enzima-chave envolvida na biossíntese de prolina (PuP5CS) para melhorar a tolerância ao sal em capim-switchgrass (*Panicum virgatum* L.). **Plant Cell Reports**, v. 37, p. 1187-1199, 2018. DOI [10.1007/s00299-018-2304-7](https://doi.org/10.1007/s00299-018-2304-7). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00299-018-2304-7>. Acesso em: 06 abril de 2025.

HAFEZ, E. M.; OSMAN, H. S.; GOWAYED, S. M.; OKASHA, S. A.; OMARA, A. E.-D.; SAMI, R.; EL-MONEM, A.M. A.; EL-RAZEK, U. A. A. Minimizing the adversely impacts of water deficit and soil salinity on maize growth and productivity in response to the application of plant growth-promoting rhizobacteria and silica nanoparticles. **Agronomy**, v. 11, n. 4, p. 676, 2021. DOI [10.3390/agronomy11040676](https://doi.org/10.3390/agronomy11040676). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/4/676>. Acesso em: 10 junho de 2025.

HOLANDA, J. S. de; AMORIM, J. R. A. de; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A. C. de; SÁ, F. V. da S. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, p. 259 – 274, 2016. Disponível em: <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 06 julho de 2025.

IBGE, 2023. Produção agrícola municipal de culturas temporárias e permanentes. **IBGE**. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 19 abril de 2024.

INSA, 2024. Delimitação do Semiárido Sergipano 2024. *Instituto Nacional do Semiárido*. <https://www.gov.br/insa/pt-br/centrais-de-conteudo/mapas/mapas-em-pdf/delimitacao-semiarido-sergipano-2024.pdf/view>. Acesso em: 19 abril de 2024.

MA, Y.; DIAS, M.C.; FREITAS, H.. Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 591911, 2020. DOI [10.3389/fpls.2020.591911](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.591911/full>. Acesso em: 10 junho de 2025.

MASUDA, M. S.; AZAD, M. A. K.; HASANUZZAMAN, M.; ARIFUZZAMAN, M. Evaluation of salt tolerance in maize (*Zea mays* L.) at seedling stage through morphological characters and salt tolerance index. **Plant Physiology Reports**, v. 26, n. 3, p. 419-427, 2021. DOI [10.1007/s40502-021-00611-2](https://doi.org/10.1007/s40502-021-00611-2). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40502-021-00611-2>. Acesso em: 07 abril de 2025.

MOUKHTARI, A. El; CABASSA-HOURTON, C.; FARISSI, M.; SAVOURÉ, A. How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development?. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 1127, 2020. DOI [10.3389/fpls.2020.01127](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01127). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.01127/full>. Acesso em: 07 abril de 2025.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review Plant Biology**, v. 59, n. 1, p. 651-681, 2008. DOI 10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/5407353_Mechanisms_of_Salinity_Tolerance. Acesso em: 07 abril de 2025.

OLIVOTO, T.; NARDINO, M. MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. **Bioinformatics**, v. 37, n. 10, p. 1383-1389, 2021. DOI 10.1093/bioinformatics/btaa981. Disponível em: <https://academic.oup.com/bioinformatics/article/37/10/1383/5998663?login=false>. Acesso em: 07 abril de 2025.

OROZCO-MOSQUEDA, M. del C.; GLICK, B. R.; SANTOYO, G. ACC deaminase in plant growth-promoting bacteria (PGPB): An efficient mechanism to counter salt stress in crops. **Microbiological Research**, v. 235, p. 126439, 2020. DOI [10.1016/j.micres.2020.126439](https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126439). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501320300173>. Acesso em: 13 junho de 2025.

PATERNIANI, M. E. A. G. Z. *et al.* Estratégias de melhoramento para tolerância à seca em germoplasma de milho tropical. **Singular. Meio Ambiente e Agrárias**, v. 1, n. 1, p. 19-24, 2019. Disponível em: <http://ulbra-to.br/singular/index.php/SingularMAA/article/view/48/23>. Acesso em: 15 maio de 2025.

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, p. 9 – 16, 2016. Disponível em: <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 15 maio de 2025.

SABAGH, A. EL *et al.* Salinity stress in maize: Effects of stress and recent developments of tolerance for improvement. **Cereal Grains: Volume 1**, p. 213, 2021. DOI [10.5772/intechopen.98745](https://doi.org/10.5772/intechopen.98745). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/353037406_Salinity_Stress_in_Maize_Effects_of_S_tress_and_Recent_Developments_of_Tolerance_for_Improvement. Acesso em: 15 maio de 2025.

SHAHID, M. A.; SARKHOSH, A.; KHAN, N.; BALAL, R. M.; ALI, S.; ROSSI, L.; GÓMEZ, C., MATTSON, N.; NASIM, W.; GARCIA-SANCHEZ, F. Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. **Agronomy**, v. 10, n. 7, p. 938, 2020. DOI [10.3390/agronomy10070938](https://doi.org/10.3390/agronomy10070938). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/7/938>. Acesso em: 12 abril de 2025.

SHRIVASTAVA, P.; KUMAR, R. Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 22, n. 2, p. 123, 2014. DOI 10.1016/j.sjbs.2014.12.001. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4336437/>. Acesso em: 09 junho de 2025.

SOARES FILHO, W. dos S.; GHEYI, H. R.; BRITO, M. E. B.; NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; MIRANDA, R. de S. Melhoramento genético e seleção de cultivares tolerantes à salinidade. *In*: GHEYI, H. R.; DIAS, N. da S.; LACERDA, C. F. de; GOMES FILHO, E. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza:

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, p. 259 – 274, 2016. Disponível em: <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 12 abril de 2025.

VAN ZELM, E.; ZHANG, Y.; TESTERINK, C. Salt tolerance mechanisms of plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, n. 1, p. 403-433, 2020. DOI [10.1146/annurev-arplant-050718-100005](https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005). Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>. Acesso em: 10 abril de 2025.

VENNAM, R. R.; BHEEMANAHALLI, R.; REDDY, K. R.; DHILLON, J.; ZHANG, X.; ADELI, A. Early-season maize responses to salt stress: Morpho-physiological, leaf reflectance, and mineral composition. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 15, p. 100994, 2024. DOI [10.1016/j.jafr.2024.100994](https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100994). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154324000310>. Acesso em: 10 abril de 2025.

WANG, P.; LI, X.; TIAN, L.; GU, Z.; YANG, R. Low salinity promotes the growth of broccoli sprouts by regulating hormonal homeostasis and photosynthesis. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 60, p. 19-30, 2018. DOI [10.1007/s13580-018-0095-y](https://doi.org/10.1007/s13580-018-0095-y). Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13580-018-0095-y>. Acesso em: 08 maio de 2025.

ZAHRA, N.; RAZA, Z. A.; MAHMOOD, S. Effect of salinity stress on various growth and physiological attributes of two contrasting maize genotypes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 63, p. e20200072, 2020. DOI [10.1590/1678-4324-2020200072](https://doi.org/10.1590/1678-4324-2020200072). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/babt/a/TNPHB5hLBHPx4D8XdYFBqVh/>. Acesso em: 11 abril de 2025.

ZHANG, F.; ZOU, Y.-N.; WU, Q.-S.; KUČA, K. Arbuscular mycorrhizas modulate root polyamine metabolism to enhance drought tolerance of trifoliolate orange. **Environmental and Experimental Botany**, v. 171, p. 103926, 2020. DOI [10.1016/j.envexpbot.2019.103926](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103926). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098847219315230>. Acesso em: 03 junho de 2025.

ZHANG, H.; MU, Y.; ZHANG, H.; YU, C. Maintenance of stem cell activity in plant development and stress responses. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1302046, 2023. DOI [10.3389/fpls.2023.1302046](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1302046). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1302046/full>. Acesso em: 11 abril de 2025.

ZHANG, H.; YU, C.; ZHANG, Q.; QIU, Z.; ZHANG, X.; HOU, Y.; ZANG, J. Salinity survival: molecular mechanisms and adaptive strategies in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, p. 1527952, 2025. DOI [10.3389/fpls.2025.1527952](https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1527952). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1527952/full>. Acesso em: 11 abril de 2025.

ZHANG, Y.; WANG, Y.; XING, J.; WAN, J.; WANG, X.; ZHANG, J.; WANG, X.; LI, Z.; ZHANG, M. Copalyl diphosphate synthase mutation improved salt tolerance in maize (*Zea mays* L.) via enhancing vacuolar Na⁺ sequestration and maintaining ROS homeostasis. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 457, 2020. DOI [10.3389/fpls.2020.00457](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00457). Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2020.00457/full>. Acesso em: 11 abril de 2025.

ZIA, A.; MUNSIF, F.; JAMAL, A.; MIHOUB, A.; SAEED, M. F.; FAWAD, M.; AHMAD, I.; ALI, A. Morpho-physiological attributes of Different maize (*Zea mays* L.) genotypes under varying salt stress conditions. **Gesunde Pflanzen**, v. 74, n. 3, p. 661-673, 2022. DOI.

10.1007/s10343-022-00641-2. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10343-022-00641-2>. Acesso em: 12 abril de 2025.

ZUFFO, A. M.; STEINER, F.; OLIVEIRA, A. M. de; RATKE, R. F.; AGUILERA, J. G.; SANTOS, A. S. dos. Tamanho de sementes e estresse hídrico e salino na germinação do milho. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 3, p. e11420-e11420, 2023. DOI

10.17765/2176-9168.2024v17n3e11420. Disponível em:

<https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/11420>. Acesso em: 14 abril de 2025.

4. ARTIGO 1

SELEÇÃO DE PROGÊNIES DE MILHO TOLERANTES AO ESTRESSE SALINO COM BASE EM ATRIBUTOS MORFOFISIOLÓGICOS E ÍNDICES MULTIVARIADOS

Artigo formatado de acordo com as normas do periódico *Plant Physiology and Biochemistry*.

RESUMO

A salinidade do solo é um dos principais fatores limitantes da produtividade do milho (*Zea mays* L.), especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez hídrica frequentemente impõe o uso de águas salinas na irrigação. Esse trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho morfofisiológico de progênies de meios-irmãos de milho submetidas ao estresse salino na fase juvenil e selecionar genótipos promissores com base em análises multivariadas. Foram avaliadas 20 progênies de meios-irmãos e um híbrido comercial de milho sob estresse salino, em delineamento de blocos casualizados, esquema fatorial 21×2 , com três repetições, utilizando duas concentrações de sais (0,14 e 3,0 dS m⁻¹), da fase V1 à V8. Foram analisadas variáveis morfológicas (altura, massas frescas e seca de folha, colmo e raiz) e fisiológicas (teor relativo de água, extravasamento de eletrólitos, índice SPAD, clorofila total e fluorescência da clorofila *a*). A salinidade afetou significativamente a maioria das variáveis, com destaque para a interação genótipos \times salinidade no teor relativo de água, indicando respostas diferenciadas entre os materiais genéticos. Os genótipos G2 e G6 mantiveram alta biomassa, elevado teor relativo de água e índices de extravasamento de eletrólitos relativamente baixos sob estresse, sugerindo maior estabilidade morfofisiológica. A Análise de Componentes Principais (PCA) agrupou as variáveis em dois componentes: produção de biomassa (PC1) e manutenção hídrica (PC2), explicando 78,1% da variância. A seleção multivariada pelo índice MGIDI confirmou G2 e G6 como os mais promissores, demonstrando que a combinação de traços morfofisiológicos é eficaz na seleção de genótipos tolerantes à salinidade.

Palavras-chave: Estresse abiótico; melhoramento genético; progênies de meios-irmãos; seleção multivariada; tolerância à salinidade; *Zea mays*.

4.1. Introdução

A salinidade do solo é um dos principais estresses abióticos que limitam a produtividade agrícola, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Esse estresse, caracterizado pelo acúmulo excessivo de sais na rizosfera, reduz o potencial osmótico do solo e compromete a absorção de água e nutrientes pelas plantas, resultando em prejuízos ao crescimento e ao rendimento das culturas (Araujo et al., 2016; Huqe et al., 2021). A presença de íons tóxicos como sódio (Na⁺) e cloreto (Cl⁻) pode desencadear desequilíbrios nutricionais, toxidez e a chamada "seca fisiológica" (Shahid et al., 2020).

Segundo a FAO (2024), mais de 800 milhões de hectares no mundo estão afetados por salinidade, incluindo áreas irrigadas. Este problema é agravado pelas mudanças climáticas, que promovem aumento da evapotranspiração e salinização progressiva de solos, especialmente em regiões tropicais (IPCC, 2023). No Baixo São Francisco, por exemplo, a intrusão salina em aquíferos e o uso crescente de águas salobras são ameaças reais à segurança hídrica e alimentar, diminuindo a disponibilidade de água doce para irrigação (Cruz et al., 2022; Heikonen et al., 2025; Sotta et al., 2021).

No semiárido brasileiro, a escassez hídrica e a irrigação com águas salinas impõem desafios à sustentabilidade agrícola (Ferreira et al., 2016; Araújo et al., 2024). O estado de Sergipe, com mais de 48% de sua área no semiárido (INSA, 2024), tem o milho (*Zea mays* L.) como cultura de destaque, com produção de 874.463 toneladas em 2023 (IBGE, 2023). No entanto, sua sensibilidade moderada à salinidade (limites de $1,1 \text{ dS m}^{-1}$ na água e $1,7 \text{ dS m}^{-1}$ no solo) limita sua expansão em áreas afetadas por sais (Gomes et al., 2011).

A tolerância à salinidade é uma característica quantitativa e multifatorial, influenciada por mecanismos como manutenção da turgescência, regulação osmótica e integridade de membranas (Brito et al., 2014; Zhang et al., 2025). A identificação de genótipos tolerantes, especialmente na fase juvenil, é uma estratégia eficiente para seleção precoce em programas de melhoramento genético.

Dessa forma, objetivou-se avaliar o desempenho morfofisiológico de progênies de meios-irmãos de milho submetidas ao estresse salino na fase juvenil e selecionar os genótipos mais promissores por meio de ferramentas estatísticas multivariadas.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Material genético e delineamento experimental

A base genética utilizada neste estudo foi composta por genótipos oriundos da População Tolerante 2 (IAC PopTol 2), desenvolvida pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) a partir de 2015. A IAC PopTol 2 apresenta ampla variabilidade genética, sendo resultante do inter cruzamento entre dois híbridos comerciais tolerantes à seca, como a variedade IAC Maya Latente, desenvolvida por Miranda et al. (1982). Essa variedade incorpora o gene *latente*, associado à tolerância a estresses abióticos, como seca, calor e geada (Bernini et al., 2016). A população IAC PopTol 2 é uma variedade de polinização aberta, com comprovada tolerância ao déficit hídrico e potencial produtivo em condições restritivas (Paterniani et al., 2019; Rocha et al., 2021).

A obtenção das progênies foi realizada em campo isolado de polinização no município de Nossa Senhora da Glória - SE, durante a safra de 2023. Foram implantadas linhas de 10 metros com espaçamento de $0,80 \times 0,20 \text{ m}$, mantendo-se isolamento mínimo de 200 metros de outros plantios de milho. Durante o florescimento, foram avaliadas 500 plantas quanto à sanidade de folhas e colmos, vigor vegetativo e a ausência de sintomas de pragas e doenças. Ao final do ciclo, foram colhidas 100 progênies de meios-irmãos. Por ocasião da avaliação da sanidade de espiga e padrão morfológico, assim como comprimento, diâmetro, número de fileiras e número de grãos por fileira na espiga, foi aplicada uma intensidade de seleção de 20%, resultando na escolha das 20 progênies mais promissoras.

As progênies selecionadas foram inicialmente identificadas como PMI-3, PMI-4, PMI-8, PMI-15, PMI-23, PMI-32, PMI-38, PMI-59, PMI-62, PMI-67, PMI-72, PMI-75, PMI-79, PMI-81, PMI-114, PMI-129, PMI-148, PMI-158, PMI-162 e PMI-167. A fim de facilitar a padronização estatística, a visualização gráfica e a apresentação dos resultados, as progênies selecionadas foram recodificadas com os códigos de G2 a G46.

Além dessas progênies, foi incluído neste estudo o híbrido simples comercial GNZ-7788 (G35), amplamente cultivado na região semiárida de Sergipe. Este híbrido apresenta ciclo de maturidade de aproximadamente 136 dias, tecnologia VIP3, estabilidade adaptativa, sanidade foliar, ótima qualidade de colmo e raiz. Destaca-se ainda por sua tolerância aos enfezamentos, sendo recomendado tanto para produção de grãos quanto de silagem (Geneze Sementes, 2025). A inclusão do GNZ-7788 teve o intuito de servir como testemunha comercial, proporcionando uma referência comparativa de desempenho para melhor contextualização dos resultados obtidos sob condições salinas.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Fazenda Experimental da Universidade Federal de Sergipe – Campus do Sertão, localizado em Nossa Senhora da Glória, SE ($10^{\circ}12'18'' \text{ S}$, $37^{\circ}19'39'' \text{ W}$, 294 m de altitude), no ano de 2024. Segundo a classificação

climática de Novais e Machado (2023), a região está inserida no tipo climático “Tr**neb”, caracterizada por clima tropical seco, nordestino do Brasil, com precipitação média anual variando de 506 a 1301 mm e evapotranspiração potencial média anual entre 905 a 1884 mm, resultando em 8 a 11 meses secos por ano.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com esquema fatorial 21 x 2 (21 genótipos × 2 concentrações de sais), com três repetições, totalizando 126 parcelas experimentais. Cada parcela foi composta por um vaso contendo uma planta.

Os tratamentos de salinidade foram: (1) água de abastecimento local, utilização como controle, com condutividade elétrica (CE) de 0,14 dS m⁻¹; e (2) água salina, com CE de 3 dS m⁻¹, obtida por diluição de água de poço com CE original de 27,5 dS m⁻¹. O valor de 3,0 dS m⁻¹ foi adotado por representar uma condição de salinidade moderada, visto que valores em torno de 2,5 dS m⁻¹ já podem reduzir em até 10% o rendimento da cultura do milho (Almeida, 2010). Além disso, a cultura do milho apresenta limiares de tolerância relativamente baixos, com valores de 1,1 dS m⁻¹ para água de irrigação e 1,7 dS m⁻¹ para o solo (Gomes et al., 2011; Soares Filho et al., 2016).

4.2.2. Instalação do experimento e manejo

O experimento foi conduzido em vasos preenchidos com substrato composto por solo e esterco bovino na proporção de 2:1, previamente peneirado em malha de 6 mm e homogeneizado. A adubação de base foi realizada conforme as exigências nutricionais da cultura do milho, considerando os resultados da análise química do substrato. Cada vaso foi adubado com 5 g de superfosfato monoamônico (MAP 11-52-00), equivalente a 2,5 g por planta, e 3 g de cloreto de potássio (KCl 00-00-58), equivalente a 1,5 g por planta, fornecendo fósforo e potássio em níveis adequados para o pleno desenvolvimento inicial das plântulas.

A semeadura foi realizada em vasos de polipropileno com dimensões de 15 x 15 x 35 cm, contendo furos de drenagem de 3,85 cm, permitindo a lixiviação do excesso de água. Foram utilizadas duas sementes por vaso, posicionadas aproximadamente a 2 cm de profundidade. Após a emergência, realizou-se o desbaste, mantendo-se apenas uma planta por vaso.

A irrigação foi conduzida por lisimetria de pesagem, com reposição diária do volume de água consumida pelas plantas. Durante o período de emergência até estágio V1, todas as plantas foram irrigadas apenas com água de baixa condutividade elétrica (CE = 0,14 dS m⁻¹). A aplicação dos tratamentos salinos foi iniciada no estágio V1 e mantida até o estágio V8, conforme os tratamentos previamente descritos.

As condições microclimáticas no interior da casa de vegetação foram monitoradas diariamente. Ao final do experimento, foram realizadas análises do substrato de cada vaso quanto ao pH, umidade (UMI) e condutividade elétrica da solução do solo (CE), segundo a metodologia descrita por Teixeira et al. (2017).

4.2.3. Características avaliadas

Foram avaliadas variáveis morfológicas no estágio fenológico V8 das plantas. A altura foi mensurada da base da planta até a aurícula da quarta (ALT_V4) e sexta folha (ALT_V6), utilizando régua graduada. O número de folhas vivas (FVI) e mortas (FMO) foi obtido por contagem direta. O diâmetro do colmo (DC) foi aferido a 20 cm acima da superfície do substrato, com auxílio de um paquímetro digital. As massas frescas das folhas (MF_F), colmo (MF_C) e raízes (MF_R) foram determinadas por pesagem em balança semianalítica, imediatamente após a colheita. As respectivas massas secas (MS_F, MS_C e MS_R) foram obtidas após secagem do material vegetal em estufa de circulação forçada a 65 °C, até atingirem peso constante.

As variáveis fisiológicas avaliadas incluíram: fluorescência da clorofila *a* (F_o, F_m, F_v e F_v/F_m), determinada na quarta folha completamente desenvolvida, utilizando fluorímetro portátil (OS-30p, Opti-Sciences®), após a adaptação do tecido ao escuro por um período de 40 min, usando-se um clipe do equipamento; a clorofila total foi mensurada com clorofilômetro

portátil (atLEAF CHL PLUS FT Green LLC®) em dois pontos da mesma folha utilizada para a fluorescência. O extravasamento de eletrólitos (EE) foi quantificado segundo o protocolo descrito por Blum e Ebercon (1981), com adaptações por Silveira et al. (2001). O teor relativo de água (TRA) foi calculado conforme o método proposto por Barrs e Weatherley (1962), com base na massa fresca, túrgida e seca das folhas.

4.2.4. Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) por meio do teste F. As médias foram comparadas usando-se o teste de Tukey ($p < 0,05$) para os níveis de salinidade, e por Scott-Knott ($\alpha = 0,05$) para os genótipos. As análises foram realizadas no software R, com os pacotes *easyanova*, *FactoMineR* e *factoextra* (Arnhold, 2013; Lê et al., 2008; Kassambara e Mundt, 2020).

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada a dados padronizados, com o objetivo de sintetizar a variabilidade multivariada observada nas variáveis. Foram incluídas na análise as variáveis mais informativas, com base nas suas variabilidades e contribuições para cada componente, para garantir maior robustez na interpretação dos padrões de agrupamento.

A seleção de genótipos superiores foi realizada com base no índice MGIDI (Multitrait Genotype-Ideotype Distance Index), considerando 20% de intensidade de seleção (Olivoto e Nardino, 2021). Para o cálculo do índice, foi realizada uma análise fatorial com base na matriz de correlação das variáveis, com extração dos fatores por meio do método de componentes principais e rotação varimax para maximizar a interpretação do comportamento das variáveis dentro de cada fator. A fim de garantir maior robustez estatística, foram incluídas apenas as variáveis que apresentaram significância na análise de variância (Tabela 1).

Dois fatores principais foram retirados. O primeiro fator (FA1) agrupou as características morfológicas relacionadas à produção de biomassa, incluindo massa fresca e seca de folha, colmo e raiz, além do diâmetro do colmo. O segundo fator (FA2) foi composto exclusivamente pelo teor relativo de água (TRA), variável fisiológica sensível ao estresse salino, indicando a capacidade de retenção hídrica das plantas.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R, com uso dos pacotes *metan* (Olivoto e Lúcio, 2020), *FactoMineR* (Lê et al., 2008).

Tabela 1 - Características avaliadas em 21 genótipos de milho: códigos, descrições, unidades e objetivos de seleção.

Código	Descrição	Unidade	Objetivo
MF_F	Massa fresca da folha	g	Aumento
MS_F	Massa seca da folha	g	Aumento
MF_C	Massa fresca do colmo	g	Aumento
MS_C	Massa seca do colmo	g	Aumento
MF_R	Massa fresca da raiz	g	Aumento
MS_R	Massa seca da raiz	g	Aumento
DC	Diâmetro do colmo	cm	Aumento
TRA_V6	Teor relativo de água	%	Aumento

NOTA: Grama (g); centímetro (cm); porcentagem (%). Objetivo de seleção: Indica a direção desejada para melhoramento (aumento do valor da característica).

4.3. Resultados

4.3.1 Análise de variância

4.3.1.1 Efeito da salinidade nas características do substrato

As análises físico-químicas do substrato demonstraram diferenças significativas entre os níveis de salinidade da água, comprovando a eficiência na indução do estresse salino (Tabela 2 e 3).

Tabela 2 - Resumo da análise de variância (ANOVA) relativa às características físico-químicas da umidade (UMI) (g g^{-1}), potencial de hidrogênio (pH) do extrato de suspensão, 1:2,5, e condutividade elétrica (CE) (dS m^{-1}) do extrato de suspensão, 1:2,5, do substrato após o período experimental de cultivo do milho até o estágio V8.

FV	GL	QM		
		UMI	pH	CE
GENÓTIPO (GEN)	20	0,0049***	0,2082*	0,2697 ns
SALINIDADE (SAL)	1	0,0422***	3,3158***	87,2743***
BLOCO	2	0,0007 ns	0,1322 ns	1,6299**
SAL*GEN	20	0,0046***	0,0703 ns	0,2404 ns
RESÍDUO	82	0,0014	0,1144	0,2771
CV (%)		14,24	5,90	32,82
Média		0,26	5,74	1,60

NOTA: ***, **, * Significativo a 0,1%, 1% e 5% de probabilidade pelo teste F; ns não significativo pelo teste F; CV (%): Coeficiente de variação em porcentagem.

A aplicação de água com maior condutividade elétrica resultou em aumento na condutividade elétrica do substrato no extrato de suspensão 1:2,5 até $2,44 \text{ dS m}^{-1}$, redução do pH para 5,57 e um aumento da umidade do substrato ($0,28 \text{ g g}^{-1}$), em comparação ao observado nas plantas irrigadas com águas de baixa condutividade elétrica (Tabela 3). Tais condições asseguram a efetividade do estresse salino, fundamentando a interpretação das respostas adaptativas dos genótipos avaliados.

Tabela 3 - Comparação de médias relativa às características físico-químicas da umidade (UMI) (% peso); potencial de hidrogênio (pH) do extrato de suspensão 1:2,5 e condutividade elétrica (CE) (dS m^{-1}) do extrato de suspensão 1:2,5 do substrato após o período experimental de cultivo do milho até o estágio V8.

Salinidade	UMI	pH	CE
1	0,24 b	5,90 a	0,77 b
2	0,28 a	5,57 b	2,44 a

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3.1.2 Respostas fisiológicas ao estresse salino

A análise de variância revelou efeito significativo da interação genótipos \times salinidade sobre o teor relativo de água (TRA), indicando que a capacidade de retenção hídrica nas plantas foi modulada pela combinação entre genótipos e níveis de salinidade. Observou-se um incremento médio de 0,91% no TRA sob condição de estresse salino ($C2 = 3,0 \text{ dS m}^{-1}$), em comparação à condição controle ($C1 = 0,14 \text{ dS m}^{-1}$), sugerindo ativação de mecanismos adaptativos associados à manutenção do status hídrico (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparação de médias do teor relativo de água (TRA, %) dos genótipos de milho avaliado no estágio fenológico V6, sob duas concentrações de sais (C1 = 0,14 dS m⁻¹ e C2 = 3,0 dS m⁻¹).

Médias dos genótipos dentro de cada concentração de sais		
GEN	TRA (C1)	TRA (C2)
G2	35,30 b	67,28 a
G3	29,26 b	23,89 a
G6	26,62 b	55,00 a
G11	18,46 b	26,87 a
G12	34,40 b	41,40 a
G14	42,70 b	46,05 a
G16	54,17 a	35,57 a
G19	41,12 b	31,48 a
G21	30,75 b	42,50 a
G24	31,43 b	44,88 a
G25	32,51 b	51,63 a
G27	67,05 a	41,23 a
G29	44,12 b	38,47 a
G30	20,18 b	37,76 a
G35	73,64 a	28,63 a
G37	55,98 a	32,29 a
G40	29,38 b	58,37 a
G41	31,62 b	44,90 a
G44	61,46 a	36,12 a
G45	26,09 b	44,36 a
G46	71,39 a	48,16 a
Média	40,83	41,75

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Dentre os genótipos avaliados, G2, G6 e G40 destacaram-se por apresentarem os maiores aumentos relativos no TRA, com acréscimos de 31,98%, 28,38% e 28,99%, respectivamente, em relação ao controle (C1). Esses resultados sugerem maior capacidade fisiológica de adaptação à salinidade, possivelmente por meio de estratégias de conservação hídrica, osmoproteção e estabilidade celular, reforçando o potencial desses materiais para ambientes salinizados.

Em contrapartida, genótipos como G35 (testemunha), G27 e G44 apresentaram reduções acentuadas no TRA sob estresse, em comparação à condição sem estresse, com decréscimos de 45,01%, 25,82% e 25,34%, respectivamente. Esses comportamentos indicam maior sensibilidade ao estresse salino e provável limitação na regulação do balanço hídrico celular (Tabela 4).

Esses achados confirmam o TRA como um marcador fisiológico eficiente para a triagem de genótipos tolerantes ao estresse salino na fase juvenil, especialmente quando utilizado em conjunto com outras variáveis morfofisiológicas em abordagens multivariadas.

A integridade da membrana plasmática, avaliada por meio de extravasamento de eletrólitos (EE), também apresentou diferença significativa entre os genótipos sob estresse. Alguns materiais demonstraram menor índice de dano, com destaque para G14, G27 e G44, cujos valores de EE foram 20%, 15,3% e 19,1% abaixo da média, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - Comparação de médias dos genótipos relativa às características fisiológicas de análise de solo e desenvolvimento de plantas (SPAD); clorofila total (TOTCH, $\mu\text{g cm}^{-2}$); eficiência quântica máxima do fotossistema II (FV/FM), avaliado no estágio fenológico V4 do milho; e extravasamento de eletrólitos (EE, %), avaliado no estágio V6.

Médias dos genótipos				
GEN	SPAD	TOTCH	FV/FM	EE
G2	51,15 a	54,9 a	0,80 b	40,77 b
G3	48,54 a	50,84 a	0,79 b	50,48 a
G6	50,87 a	54,35 a	0,78 b	56,84 a
G11	46,27 a	47,08 a	0,79 b	43,77 b
G12	51,83 a	55,84 a	0,79 b	41,04 b
G14	51,53 a	55,38 a	0,80 b	28,26 b
G16	47,87 a	49,63 a	0,80 b	67,47 a
G19	45,65 a	46,23 a	1,05 a	57,46 a
G21	46,29 a	47,43 a	0,96 a	49,32 a
G24	49,24 a	51,62 a	0,78 b	43,58 b
G25	49,18 a	51,58 a	0,79 b	44,03 b
G27	48,43 a	50,35 a	0,79 b	32,72 b
G29	48,32 a	50,19 a	0,80 b	55,78 a
G30	50,78 a	54,1 a	0,79 b	56,94 a
G35	50,2 a	53,21 a	0,80 b	44,4 b
G37	43,94 a	43,62 a	0,78 b	35,88 b
G40	48,28 a	50,22 a	0,80 b	34,61 b
G41	51,3 a	54,93 a	0,78 b	69,26 a
G44	48,89 a	51,14 a	0,80 b	29,17 b
G45	49,21 a	51,67 a	0,80 b	71,64 a
G46	48,32 a	50,44 a	0,79 b	37,2 b
Média	48,86	51,18	0,81	47,17

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O genótipo G2, além de destacar-se no TRA, também apresentou EE 6,8% abaixo da média, indicando uma resposta fisiológica consistente frente ao estresse. No entanto, vale ressaltar que o G27, embora tenha exibido menor extravasamento de eletrólitos, apresentou produção de biomassa limitada, o que evidencia que a manutenção da integridade celular, isoladamente, não garante um desempenho agrônômico superior. Esse contraste reforça a necessidade de abordagens integradas para a seleção de genótipos mais adaptados.

Quanto à fluorescência da clorofila *a* (Fv/Fm), os genótipos G19 e G21 mantiveram os maiores valores sob estresse salino, com médias de 1,05 e 0,96, respectivamente, superando a testemunha GNZ-7788 (0,80) (Tabela 5). Esses valores sugerem maior eficiência do fotossistema II (PSII) sob salinidade, o que indica maior comprometimento dos complexos fotossintéticos em condições adversas. Contudo, o G19, apesar da elevada eficiência fotoquímica, apresentou redução significativa na produção de biomassa, o que reforça que a estabilidade fotossintética isoladamente não é suficiente para assegurar desempenho superior sob estresse salino.

4.3.1.3 Desempenho morfológico ao estresse salino

O estresse salino promoveu redução significativa nas massas fresca e seca da parte aérea da maioria das progênies avaliadas, evidenciando seu impacto negativo sobre o crescimento vegetativo do milho. Apesar disso, alguns genótipos apresentaram desempenho superior mesmo sob a condição de condutividade elétrica de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ em relação à média geral, sugerindo maior tolerância morfológica (Tabela 6).

Tabela 6 - Comparação de médias dos genótipos para características morfológicas avaliadas no estádio V8 do milho, dentro de cada concentração de sais (C1 = 0,14 dS m⁻¹ e C2 = 3,0 m⁻¹): massa fresca da folha (MF_F_C1 e MF_F_C2); massa seca da folha (MS_F_C1 e MS_F_C2); massa fresca do colmo (MF_C_C1 e MF_C_C2); massa seca do colmo (MS_C_C1 e MS_C_C2).

Médias dos genótipos em g planta ⁻¹ dentro de cada concentração de sais									
GEN	MF_F_C1	MF_F_C2	MS_F_C1	MS_F_C2	MF_C_C1	MF_C_C2	MS_C_C1	MS_C_C2	
G2	87,28 a	70,57 a	21,39 a	19,63 a	170,47 a	134,82 a	16,57 b	15,67 a	
G3	85,77 a	45,78 b	19,78 a	10,85 c	186,27 a	100,00 b	20,04 a	9,04 b	
G6	90,60 a	78,82 a	18,86 a	18,02 a	187,85 a	171,04 a	20,28 a	16,83 a	
G11	87,30 a	34,32 b	18,30 a	7,82 c	185,70 a	72,57 b	18,30 a	6,56 b	
G12	84,06 a	58,30 a	21,20 a	13,45 b	169,91 a	105,42 b	16,51 b	10,83 b	
G14	92,25 a	54,35 a	20,07 a	12,56 b	185,47 a	144,07 a	20,62 a	14,31 a	
G16	81,37 a	53,61 a	20,00 a	12,83 b	132,23 c	138,99 a	12,95 b	13,69 a	
G19	94,10 a	37,63 b	21,97 a	8,88 c	192,20 a	82,52 b	18,38 a	7,45 b	
G21	82,11 a	63,27 a	18,07 a	13,52 b	183,51 a	151,68 a	18,07 a	13,41 a	
G24	99,81 a	39,63 b	21,34 a	9,54 c	217,24 a	93,61 b	23,34 a	10,96 b	
G25	85,09 a	48,18 b	18,49 a	11,50 c	188,26 a	104,24 b	19,33 a	9,91 b	
G27	49,63 b	47,38 b	9,44 c	11,07 c	108,45 c	132,54 a	7,55 c	13,03 a	
G29	101,97 a	46,08 b	23,36 a	9,62 c	206,91 a	95,84 b	21,91 a	8,42 b	
G30	67,70 b	39,48 b	15,49 b	8,24 c	151,89 b	125,51 a	14,00 b	9,78 b	
G35	108,00 a	67,08 a	23,64 a	15,08 b	179,90 a	121,96 a	19,93 a	11,84 b	
G37	95,33 a	43,95 b	19,39 a	9,29 c	193,27 a	105,56 b	16,51 b	9,36 b	
G40	87,42 a	42,30 b	18,32 a	9,40 c	161,77 b	110,66 b	15,30 b	10,27 b	
G41	95,71 a	59,62 a	23,66 a	13,24 b	196,93 a	127,75 a	23,78 a	11,07 b	
G44	72,03 b	52,16 a	15,93 b	9,97 c	157,23 b	90,80 b	13,49 b	9,20 b	
G45	82,39 a	45,39 b	17,63 a	8,97 c	184,36 a	88,90 b	15,55 b	17,54 a	
G46	80,93 a	20,56 b	18,30 a	4,45 c	157,49 b	35,59 c	16,94 b	3,25 b	
Média	86,23	49,93	19,27	11,33	176,06	111,15	17,59	11,07	

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os genótipos G2 e G6 apresentaram os maiores acréscimos relativos na massa seca de folha (MS_F_C2), com aumentos de 18,04% e 12,46% em relação à média geral, respectivamente. Esses mesmos materiais também se destacaram na massa seca do colmo (MS_C_C2), com acréscimo de 20,79% (G2) e 26,03% (G6). Outros genótipos com desempenho superior para massa seca do colmo incluem G45 (29,24%), G14 (14,65%), G16 (11,85%), G21 (10,58%) e G27 (8,87%), valores esses acima da média, mesmo sob salinidade.

O híbrido comercial G35 (GNZ - 7788) apresentou desempenho intermediário, com 16,55% acima da média para massa seca da folha e 3,49% para o colmo, sob condições salinas. Esses resultados demonstram que algumas progênies experimentais possuem potencial para igualar ou superar o desempenho de um material comercialmente estabelecido.

A avaliação do sistema radicular revelou que a salinidade também comprometeu significativamente o desenvolvimento das raízes, resultando em redução acentuada nas massas fresca e seca das raízes da maioria dos genótipos (Tabela 7). Entretanto, alguns materiais conservaram um padrão de crescimento radicular mais estável, indicando maior capacidade adaptativa sob estresse.

Tabela 7 - Comparação de médias dos genótipos para características morfológicas avaliadas no estágio V8 do milho, dentro de cada concentração de sais (C1 = 0,14 dS m⁻¹ e C2 = 3,0 m⁻¹): massa fresca da raiz (MF_R_C1 e MF_R_C2); Massa seca da raiz (MS_R_C1 e MS_R_C2).

Médias dos genótipos em g planta ⁻¹ dentro de cada concentração de sais					
GEN	MF_R_C1	MF_R_C2	MS_R_C1	MS_R_C2	
G2	30,00	b	33,70	a	6,39 b 5,99 a
G3	31,50	b	19,17	b	6,17 b 4,08 a
G6	33,10	b	31,48	a	7,82 a 4,90 a
G11	19,20	b	7,18	b	4,73 b 1,77 a
G12	34,77	b	17,47	b	8,81 a 2,98 a
G14	36,78	a	24,40	a	9,51 a 3,72 a
G16	29,94	b	26,02	a	5,42 b 4,00 a
G19	27,15	b	12,12	b	5,75 b 1,48 a
G21	30,41	b	31,25	a	7,11 a 4,85 a
G24	49,43	a	14,21	b	8,27 a 2,59 a
G25	30,56	b	14,05	b	7,74 a 2,81 a
G27	13,44	b	19,78	b	2,46 b 3,36 a
G29	42,01	a	14,05	b	7,81 a 2,47 a
G30	24,60	b	16,86	b	4,10 b 2,11 a
G35	47,12	a	29,78	a	10,85 a 4,39 a
G37	31,09	b	12,12	b	5,18 b 1,86 a
G40	47,60	a	13,22	b	11,88 a 2,28 a
G41	47,85	a	21,57	a	10,07 a 2,97 a
G44	23,36	b	16,16	b	4,92 b 2,47 a
G45	38,62	a	13,61	b	6,15 b 1,98 a
G46	33,01	b	3,58	b	7,87 a 0,84 a
Média	33,41		18,16		7,10 3,04

NOTA: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Sob salinidade, os genótipos G2, G6, G21, G35, G16, G14 e G41 apresentaram massa fresca de raiz (MF_R_C2), com incremento em relação à média de 40,32%, 34,37%, 33,75%, 29,81%, 19,74%, 15,39% e 7,81%, respectivamente. Esses resultados indicam maior resiliência morfológica na manutenção do desenvolvimento do sistema radicular em ambientes salinizados.

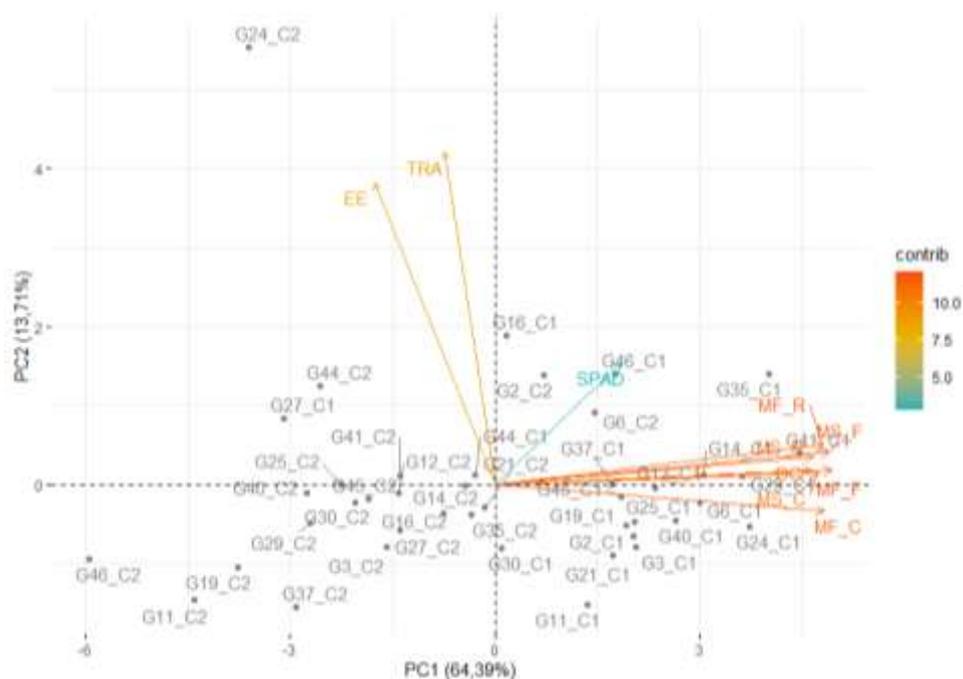
Embora não tenham sido observadas diferenças estatisticamente significativas para a massa seca das raízes (MS_R_C2) entre os genótipos sob salinidade, os valores absolutos observados reforçam a tendência morfológica já evidenciada na parte aérea, sugerindo consistência no desenvolvimento e possível estabilidade fisiológica associada.

De modo geral, a salinidade comprometeu significativamente o desempenho morfológico das plantas. Contudo, os genótipos G2, G6, G14, G16 e G21 destacaram-se por apresentarem massas fresca e seca das folhas, colmos e raízes superiores à média geral sob condições salinas. Em especial, G2 e G6 exibiram os maiores incrementos, demonstrando maior resiliência ao estresse salino. Esses achados evidenciam o potencial desses materiais para seleção em programas de melhoramento genético voltados à tolerância a salinidade.

4.3.2 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada para sintetizar a variabilidade morfofisiológica dos genótipos sob condições contrastantes de salinidade. Os dois primeiros componentes principais explicaram 78,1% da variância total, sendo 64,39% atribuídos ao primeiro componente (PC1) e 13,71% ao segundo (PC2), garantindo adequada representatividade dos dados (Figura 1).

Figura 1 - Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) com as variáveis morfológicas e fisiológicas de maior contribuição, evidenciando a distribuição dos genótipos de milho sob diferentes concentrações de sais.



NOTA: Massa fresca da folha (MF_F); Massa seca da folha (MS_F); Massa fresca do colmo (MF_C); Massa seca do colmo (MS_C); Massa fresca da raiz (MF_R); Massa seca da raiz (MS_R); análise de solo e desenvolvimento de plantas (SPAD); teor relativo de água em V6 (TRA); extravasamento de eletrólitos em V6 (EE).

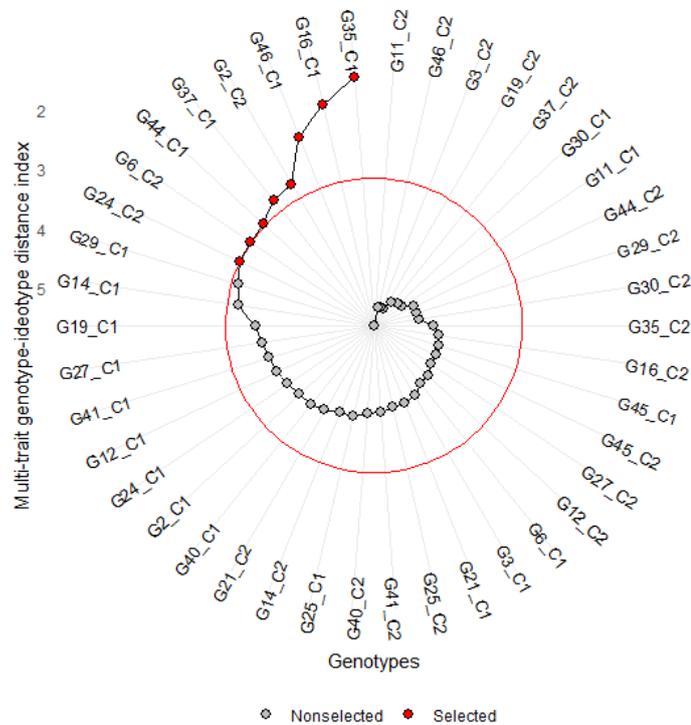
O PC1 foi predominantemente associado às variáveis morfológicas de crescimento, como massas frescas e secas da folha, colmo e raízes, além do diâmetro do colmo, caracterizando este eixo como um indicativo de acúmulo de biomassa e vigor. O PC2 foi influenciado pelo teor relativo de água (TRA) e o extravasamento de eletrólitos (EE), refletindo mecanismos fisiológicos relacionados à manutenção hídrica e à integridade das membranas celulares. A contribuição dessas variáveis destaca a importância homeostase hídrica e da estabilidade celular na adaptação ao estresse salino.

Os genótipos foram agrupados em três padrões principais: (1) aqueles com desempenho morfofisiológico superior, como G2_C2, G6_C2, G14_C1, G16_C1, G41_C1, G46_C1 e G35_C1 (testemunha) que apresentaram escores positivos em ambos os componentes, situados no quadrante superior direito; (2) genótipos intermediários; e (3) genótipos sensíveis, como G46_C2, G11_C2, G19_C2, G37_C2, G14_C2, G16_C2, e G35_C2 posicionados no quadrante inferior esquerdo, indicando baixa produtividade e maior sensibilidade fisiológica à salinidade (Figura 1).

4.3.3 Seleção de genótipos por meio do índice MGIDI

A aplicação do índice MGIDI possibilitou a identificação de genótipos com desempenho multivariado superior nas duas concentrações de sais, considerando simultaneamente características morfológicas e fisiológicas. Com base nos valores do MGIDI, foi possível ranquear os materiais quanto à proximidade ao ideótipo, permitindo uma seleção mais precisa e integrada (Figura 2).

Figura 2 - Índice MGIDI dos genótipos de milho avaliados sob diferentes concentrações de sais.



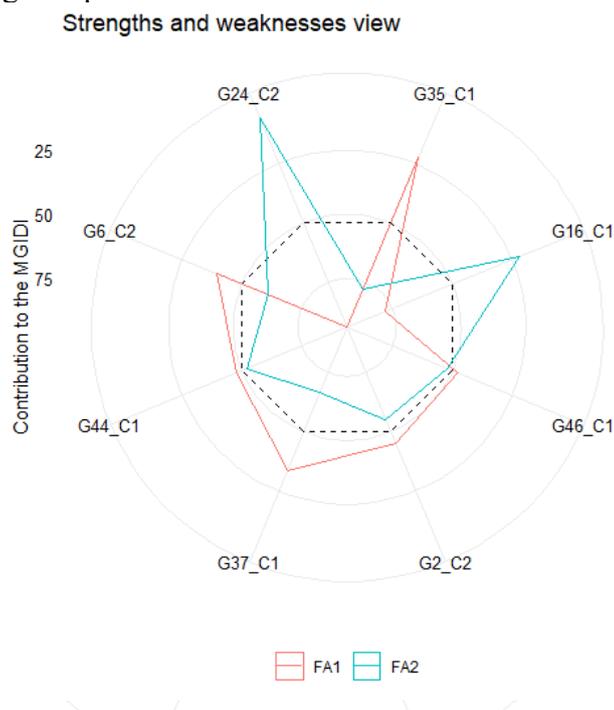
NOTA: Os genótipos selecionados estão em vermelho. O círculo representa o ponto de corte mediante a intensidade de seleção de 20%.

Na condição sem estresse (C1), foram selecionados os genótipos G35_C1 (testemunha), G16_C1, G46_C1, G37_C1 e G44_C1, os quais apresentaram os menores valores de MGIDI, indicando desempenho próximo ao ideal. Já sob estresse salino (C2), destacaram-se os genótipos G2_C2, G6_C2 e G24_C2, que mantiveram desempenho superior mesmo em ambiente adverso (Figura 2).

4.3.3.1 Análise dos pontos fortes e fracos dos genótipos selecionados

A avaliação da contribuição dos fatores latentes para os valores totais do índice MGIDI permitiu compreender os pontos fortes e limitações específicas de cada genótipo, com base em sua distância em relação ao ideótipo para cada fator (Figura 3). O primeiro fator (FA1) esteve associado à produção de biomassa (massa fresca e seca de folhas, colmo e raiz, além do diâmetro do colmo), enquanto o segundo fator (FA2) refletiu o desempenho fisiológico, representado pelo teor relativo de água (TRA).

Figura 3 - Contribuição relativa dos fatores FA1 (biomassa) e FA2 (TRA) para o valor total do índice MGIDI dos genótipos selecionados.



NOTA: Fator 1 (FA1); fator 2 (FA2).

Os genótipos G24_C2 e G16_C1 apresentaram alta contribuição do MGIDI para o FA1, indicando baixa produção de biomassa. No entanto, ambos exibiram contribuição reduzida do MGIDI para o FA2, o que sugere maior eficiência na manutenção do estado hídrico sob estresse salino. Esse comportamento fisiológico favorável, mesmo diante de limitações morfológicas, confere destaque ao genótipo G24_C2, com forte potencial de tolerância fisiológica à salinidade.

Por outro lado, os genótipos G35_C1 e G37_C1 mostraram desempenho morfológico consistente, dada a baixa contribuição do MGIDI para o FA1, mas apresentaram limitações fisiológicas, evidenciadas pela elevada contribuição do MGIDI para o FA2, mesmo sob baixa salinidade. Isso indica menor eficiência na regulação hídrica e possível sensibilidade ao estresse osmótico, o que pode comprometer o desempenho desses genótipos em ambientes salinos.

Os genótipos G2_L2 e G6_L2 apresentaram contribuições equilibradas entre FA1 e FA2, indicando desempenho satisfatório tanto morfológico quanto fisiológico sob estresse salino. Essa combinação de atributos os posiciona como os mais promissores para ambientes salinos. Já os genótipos G44_C1 e G46_C1 também demonstraram equilíbrio entre os fatores, embora esse desempenho tenha sido observado apenas em condições sem estresse, o que pode limitar sua recomendação para ambientes salinizados.

4.4. Discussão

A exposição das progênies de meios-irmãos ao estresse salino resultou em respostas morfofisiológicas contrastantes entre os genótipos, evidenciando a existência de variabilidade genética para os atributos avaliados. Essa variabilidade é essencial para programas de melhoramento genético, especialmente aqueles baseados em seleção recorrente, pois indica a presença de alelos favoráveis à manutenção da homeostase celular sob condições adversas, refletindo um possível controle quantitativo da tolerância à salinidade (Borém et al., 2021; Valadares et al., 2022).

Os efeitos deletérios da salinidade sobre as características morfofisiológicas dos genótipos de milho avaliados neste estudo corroboram as evidências da literatura, que

reconhecem a salinização como um dos principais fatores limitantes ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Freire et al., 2016; Villa et al., 2019; Zuffo et al., 2023; Vennam et al., 2024). A redução da biomassa vegetal observada na maioria dos genótipos sob estresse salino está diretamente associada à diminuição do potencial osmótico da solução do solo, que compromete a absorção de água e nutrientes, induzindo uma condição de “seca fisiológica” (Dias et al., 2016; Shahid et al., 2020; Zia et al., 2022).

O teor relativo de água (TRA), a eficiência do fotossistema II (F_v/F_m) e o extravasamento de eletrólitos (EE) destacaram-se como variáveis fisiológicas sensíveis na detecção da tolerância à salinidade na fase juvenil do milho. Dentre elas, o TRA demonstrou incremento médio de 0,91% sob estresse salino, indicando que, em média, os genótipos conseguiram manter ou até ampliar a hidratação celular. Esse comportamento sugere a ativação de mecanismos adaptados, como o ajuste osmótico e a regulação estomática, que contribuem para a preservação da turgescência e da funcionalidade metabólica.

Resultados semelhantes foram reportados por Javed et al. (2021), que observaram aumento no TRA em plantas de milho cultivadas sob estresse salino quando fornecido adequadamente o nitrogênio, destacando o papel modulador da nutrição mineral na resposta fisiológica. Por outro lado, estudos como o de Hafez et al. (2021) demonstraram que a associação entre estresses salino e hídrico reduziu significativamente o TRA, reforçando que essa variável é altamente dependente da interação entre genótipo e ambiente.

Nesse estudo, os genótipos G2, G6 e G40 apresentaram os maiores incrementos de TRA sob estresse, superando inclusive a testemunha GNZ-7788 (G35). Esse desempenho sugere maior capacidade de manutenção do equilíbrio hídrico e tolerância ao estresse osmótico, atributos geralmente associados ao acúmulo de solutos compatíveis, maior eficiência de fechamento estomático e integridade das membranas celulares (Silveira et al., 2016; Fernandes et al., 2016).

A manutenção da integridade das membranas, avaliada pelo extravasamento de eletrólitos (EE), mostrou que genótipos como G14, G27, G44 e G2 apresentaram menores taxas de eletrólitos liberados, o que sugere uma maior eficiência dos sistemas antioxidantes e menor acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs). A menor liberação de eletrólitos pode estar relacionada à ativação de enzimas como SOD, CAT e POD, responsáveis pela desintoxicação de EROs, além da síntese de solutos compatíveis como prolina e glicina-betaína, que estabilizam estruturas de membranas e proteínas (Zahra et al., 2020; Zhang et al., 2020). Embora o G27 tenha exibido baixo EE, sua baixa biomassa sob estresse indica que a manutenção da integridade celular isoladamente não garante alta performance agrônômica, reforçando a importância de abordagens multivariadas.

A fluorescência da clorofila *a*, em especial a razão F_v/F_m , é reconhecida como um dos indicadores mais sensíveis da integridade e funcionalidade do fotossistema II, sendo amplamente utilizada na detecção precoce de estresse em plantas (Guidi et al., 2019; Zhou et al., 2019; Stefanov et al., 2021). Embora não tenha apresentado interação significativa na ANOVA, os valores médios evidenciaram que os genótipos G19 e G21 mantiveram índices estatisticamente superiores ao da testemunha GNZ-7788 (0,80), valor considerado ideal em condições não estressantes (Ruan et al., 2017; Guidi et al., 2019).

Essa estabilidade da F_v/F_m sugere uma menor fotoinibição e maior capacidade de dissipação controlada da energia luminosa, reforçando a resiliência funcional desses genótipos. Stefanov et al. (2021), em seu estudo, evidenciaram queda da F_v/F_m no milho sob altas concentrações de sal, além de destacar o fechamento excessivo de centros de reação e comprometimento do fluxo eletrônico no PSII. Portanto, a manutenção de F_v/F_m maior que 0,80, como observada em G19 e G21, pode indicar menor acúmulo de danos fotossintéticos e preservação da integridade do aparato fotossintético.

A redução da biomassa acumulada sob salinidade foi evidente na maioria dos genótipos, resultados também observados por outros autores em estudos anteriores (Villa et al., 2019; Huqe et al., 2021; Zia et al., 2022; Vennam et al., 2024). No entanto, os genótipos G2, G6, G14,

G16 e G21 mantiveram elevados valores de biomassa, tanto na parte aérea quanto no sistema radicular, com destaque para G2 e G6, que apresentaram os maiores incrementos sob estresse. Esse desempenho sugere superioridade morfológica e maior resiliência estrutural frente à salinidade.

Essas performances podem estar associadas à manutenção da turgescência celular, uma vez que G2 e G6 apresentaram aumento de 31,98% (G2), 28,38% (G6) no teor relativo de água, respectivamente, sob salinidade. Isso indica maior capacidade de regulação osmótica, controle dos estômatos e retenção de água, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento da planta (Ahmad et al., 2022). Além disso, o genótipo G2 apresentou extravasamento de eletrólitos 6,8% inferior à média geral, reforçando sua eficiência na integridade das membranas celulares e na seletividade para o acúmulo de solutos compatíveis.

A capacidade desses genótipos em manter o desempenho morfofisiológico sob condições salinas indica potencial para utilização em programas de melhoramento, especialmente por meio de cruzamentos dialélicos, visando o mapeamento de *loci* associados à tolerância à salinidade (Pfann et al., 2009; Rohman et al., 2019). Contudo, é importante ressaltar que a expressão dessa tolerância pode variar em função das interações genótipos \times ambientes (G \times A). Por isso, a validação dos genótipos promissores em diferentes condições edafoclimáticas é importante para garantir sua estabilidade e adaptabilidade no campo como realizado no estudo de Pratt et al. (2021).

A análise de componentes principais (PCA) sintetizou a variabilidade entre os genótipos em dois componentes principais, sendo o PC1 responsável por 64,4% da variância, associado às variáveis de biomassa, enquanto o PC2 explicou 13,7%, fortemente correlacionado ao TRA e EE, juntos, os componentes explicaram 78,1% da variância total, valor expressivo que garante boa representatividade da diversidade observada, conforme também relatado por Zia et al. (2022) em estudos com milho sob salinidade.

A distribuição dos genótipos no biplot de PCA sugere a existência de dois conjuntos de atributos determinantes para a tolerância à salinidade: um relacionado à produtividade e outro à integridade fisiológica. Genótipos como G2_C2, G6_C2, G14_C1, G16_C1, G41_C1, G46_C1 e a testemunha (G35_C1) demonstraram desempenho superior para ambos os conjuntos de atributos. Por exemplo, G2_C2 apresentou escores de (0,717) para PC1 e (1,384) para PC2, enquanto G6_C2 obteve (1,461) e (0,913), respectivamente, aproximando-se da testemunha G35_C1, que apresentou escores de (4,014) em PC1 e (1,409) em PC2. Essas diferenças apontam para a superioridade funcional de G2 e G6, especialmente por manterem esse desempenho sob condição salina (C2), o que reforça sua superioridade morfofisiológica.

A performance superior desses genótipos sob salinidade indica a presença de mecanismos múltiplos de tolerância, com possíveis solutos compatíveis (como prolina, glicina-betaína e açúcares solúveis), além da manutenção do potencial hídrico. A capacidade de sustentar a produção de biomassa (acima de 205 g planta⁻¹) e manter elevados teores de TRA (superiores a 55%) mesmo sob C2 torna G2 e G6 candidatos altamente promissores para programas de melhoramento genético, principalmente em regiões onde a salinização do solo é um fator limitante à produtividade do milho.

Além disso, a presença da testemunha GNZ-7788 (G35) entre os genótipos com bom desempenho reforça a confiabilidade dos critérios utilizados, ao passo que sua superação por outras progênies demonstra o potencial genético do material avaliado. Com isso, a PCA se mostra não apenas uma ferramenta estatística de redução de dimensionalidade, mas um recurso valioso para sintetizar a complexidade dos dados morfofisiológicos em indicadores claros de desempenho adaptativo, permitindo ao melhorista tomar decisões mais seguras na seleção de genótipos (Hongyu et al., 2016; Zia et al., 2022).

A seleção multivariada por meio do índice MGIDI mostrou-se eficiente na identificação de genótipos superiores. A distinção de genótipos com desempenho parcial, como G24_C2 (alta eficiência hídrica e menor acúmulo de biomassa), reforça a importância da abordagem multivariada para evitar decisões baseadas em variáveis isoladas. Genótipos com esse

comportamento podem ser úteis como doadores de alelos específicos em cruzamentos dirigidos (Olivoto et al., 2022; Subramani et al., 2024).

Os genótipos G2 e G6 destacaram-se com menores distâncias genótipo-ideótipo, evidenciando equilíbrio entre características produtivas e fisiológicas. A decomposição do índice mostrou que o fator FA1 foi fortemente influenciado pela massa fresca e seca de folhas, colmo e raiz, enquanto o FA2 teve contribuição do TRA, o que indica que os genótipos selecionados foram aqueles capazes de manter crescimento e integridade fisiológica simultaneamente.

Além disso, a manutenção da massa do colmo e das folhas pode estar associada à maior eficiência no transporte de fotoassimilados e acúmulo de reservas, o que contribui para a resiliência estrutural e fisiológica da planta. Embora a massa do colmo não tenha sido mensurada diretamente por Ahmad et al. (2022), os genótipos mais tolerantes à salinidade identificados no estudo apresentaram alto desempenho em características como área foliar, taxa fotossintética e rendimento de grãos, o que pressupõe um sistema eficiente de transporte e acúmulo de fotoassimilados. Dessa forma, a manutenção da massa do colmo e das folhas pode ser interpretada como indicativo da integridade funcional do sistema fonte-dreno, contribuindo para o desempenho adaptativo das plantas sob estresse salino.

A tolerância à salinidade é uma característica complexa, com base poligênica, afetada por interações genótipos x ambientes, e modulada por rotas metabólicas relacionadas à homeostase iônica, detoxificação de EROs e sinalização hormonal (Zhang et al., 2023; Zhang et al., 2025). Estratégias de melhoramento baseadas na seleção de genótipos tolerantes, como evidenciado neste trabalho, podem ser aceleradas com a integração de ferramentas genômicas e fenotípicas, promovendo o desenvolvimento de cultivares adaptadas a solos salinos, com destaque para regiões semiáridas (Masuda et al., 2021).

Assim, os resultados obtidos não apenas identificam materiais promissores como G2 e G6, mas também demonstram a viabilidade de uso de parâmetros fisiológicos combinados à análise multivariada para seleção precoce de genótipos de milho com maior resiliência à salinidade. A continuidade deste trabalho permitirá estudos mais avançados em fases posteriores do ciclo da cultura, bem como a validação em condições de campo, onde as interações genótipos x ambientes ($G \times A$) são mais complexas, para confirmar o desempenho agrônomico dos genótipos promissores em ambientes salinos.

4.5. Conclusões

A salinidade reduziu de forma expressiva a biomassa e a eficiência das plantas;
Há ampla variação genética entre as progênies quanto à tolerância ao estresse salino;
Os genótipos G2 e G6 foram os mais promissores, reunindo atributos morfofisiológicos superiores sob salinidade;

O uso de ferramentas multivariadas, como o índice MGIDI, é recomendável para estudos de seleção precoce em ambientes controlados;

Recomenda-se a validação desses resultados em condições de campo e em fases mais avançadas do ciclo da cultura, a fim de confirmar o desempenho agrônomico dos genótipos promissores em ambientes salinos;

Recomenda-se a realização das análises bioquímicas, como atividade de enzimas antioxidantes (SOD, CAT e POD) e a quantificação de solutos osmoprotetores (prolina, glicina-betaina e açúcares solúveis), para aprofundar a compreensão dos mecanismos fisiológicos de tolerância e fortalecer os critérios de seleção de genótipos em programas de melhoramento;

Recomenda-se a quantificação dos teores de sódio (Na^+), potássio (K^+), cloreto (Cl^-) e a razão K^+/Na^+ em tecidos foliares e no solo, visto que esses parâmetros são determinantes para a homeostase iônica e para o funcionamento celular sob estresse salino.

4.6. Referências Bibliográficas

- Ahmad, K., Aslam, M., Saleem, M.H., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Hassan, A., El-Sheikh, M.A., et al., 2022. Genetic diversity and characterization of salt stress tolerance traits in maize (*Zea mays* L.) under normal and saline conditions. *Pak. J. Bot.* 54(3), 759–769. [https://doi.org/10.30848/PJB2022-3\(31\)](https://doi.org/10.30848/PJB2022-3(31)).
- Almeida, O.A., 2010. Qualidade da água de irrigação. *Embrapa Mandioca e Fruticultura*, Cruz das Almas.
- Araujo, E.B.G., Sá, F.V.S., Oliveira, F.A., Souto, L.S., Paiva, E.P., Silva, M.K.N., Mesquita, E.F., et al., 2016. Crescimento inicial e tolerância de cultivares de meloeiro à salinidade da água. *Rev. Ambient. Água* 11, 462–471. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1726>.
- Araújo, K.C.T., Santos, W.M., Gonzaga, M.I.S., Silva, A.N.C., Sobral, L.F., 2024. Biochar improved soil salinity, mitigated sodium toxicity, and improved plant growth in salt-affected soils. *Res. Soc. Dev.* 13(12), e95131247723. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i12.47723>.
- Arnhold, E., 2013. Package in the R environment for analysis of variance and complementary analyses. *Braz. J. Vet. Res. Anim. Sci.* 50(6), 488–492. <https://doi.org/10.11606/issn.1678-4456.v50i6p488-492>.
- Barrs, H.D., Weatherley, P.E., 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Aust. J. Biol. Sci.* 15, 413–428.
- Bernini, C.S., Guimarães, P.S., Carlini-Garcia, L.A., Paterniani, M.E.A.G.Z., 2016. Caracteres fisiológicos e agrônômicos em progênies interpopulacionais de milho selecionadas sob condições de déficit hídrico. *Rev. Bras. Milho Sorgo* 15(1), 39–52.
- Blum, A., Ebercon, A., 1981. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. *Crop Science* 21(1), 43–47. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100010013x>.
- Borém, A., Miranda, G.V., Fritsche-Neto, R. Melhoria de plantas. 8ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.
- Brito, M.E.B., Fernandes, P.D., Gheyi, H.R., Melo, A.S., Soares Filho, W.S., Santos, R.T., 2014. Sensibilidade à salinidade de híbridos trifoliados e outros porta-enxertos de citros. *Revista Caatinga* 27(1), 17–27.
- Cruz, M.A.S. et al. A salinidade da água no baixo São Francisco. In: Soares, E.C., Silva, J.V., Silva, T.J., 2022. *O Baixo São Francisco: características ambientais e sociais*, 2, 235–247.
- Dias, N.S., Blanco, F.F., Souza, E.R., Ferreira, J.F.S., Sousa Neto, O.N., Queiroz, I.S.R., 2016. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. In: Gheyi, H.R., Dias, N.S., Lacerda, C.F., Gomes Filho, E. *Manejo da salinidade na agricultura: estudo básico e aplicados*, INCTSal, 151–162 (s.d.).
- FAO. Extent of salt-affected soils. <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/management-of-some-problem-soils/salt-affected-soils/more-information-on-salt-affected-soils/en/>. Acesso em: abril de 2024.

- Fernandes, P.D., Brito, M.E.B., Ghayi, H.R., Andrade, A.P., Medeiros, S.S., 2016. Halofitismo e agricultura bioassalina. In: Gheyi, H.R., Dias, N.S., Lacerda, C.F., Gomes Filho, E. *Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados*, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 209–242.
- Ferreira, P.A., Silva, J.B.L., Ruiz, H.A., 2016. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: Gheyi, H.R., Dias, N.S., Lacerda, C.F., Gomes Filho, E. *Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados*, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 259–274.
- Freire, J.L.O., Cavalcante, L.F., Dantas, M.M.M., Silva, A.G., Henriques, J.S., Zuza, J.F.C., 2016. Estresse salino e uso de biofertilizantes como mitigadores dos sais nos componentes morfofisiológicos e de produção de glicófitas. *Revista Principia* (29), 30–38. <https://doi.org/10.18265/1517-03062015v1n29p29-38>.
- Geneze Sementes. GNZ 7788: segurança com qualidade de colmo e raiz. Curitiba, 1, 2025. https://genezesementes.com.br/uploads/1481.6_Catalogo_versao_digital_7788_1.pdf. Acesso em: julho de 2025.
- Gomes, K.R., Amorim, A.V., Ferreira, F.J., Filho, F.L.A., Lacerda, C.F., Gomes-Filho, E., 2011. Respostas de crescimento e fisiologia do milho submetido a estresse salino com diferentes espaçamentos de cultivo. *Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental* 15, 365–370. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400006>.
- Guidi, L., Lo Piccolo, E., Landi, M., 2019. Chlorophyll fluorescence, photoinhibition and abiotic stress: does it make any difference the fact to be a C3 or C4 species? *Front. Plant Sci.* 10, 174. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00174>.
- Hafez, E.M., Osman, H.S., Gowayed, S.M., Okasha, S.A., Omara, A.E.-D., Sami, R., El-Monem, A.M.A., El-Razek, U.A.A., 2021. Minimizing the adversely impacts of water deficit and soil salinity on maize growth and productivity in response to the application of plant growth-promoting rhizobacteria and silica nanoparticles. *Agronomy* 11(4), 676. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040676>.
- Heikonen, S., Heino, M., Jalava, M., Siebert, S., Viviroli, D., Kumm, M., 2025. Climate change threatens crop diversity at low latitudes. *Nat. Food* 1–12. <https://doi.org/10.1038/s43016-025-01135-w>.
- Hongyu, K., Sandanielo, V.L.M., Oliveira Junior, G.J., 2016. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S Eng. Sci.* 5(1), 83–90. <https://doi.org/10.18607/ES201653398>.
- Huqe, M.A.S., Haque, M.S., Sagar, A., Uddin, M.N., Hossain, M.A., Hossain, A.Z., Rahman, M.M., Wang, X., Al-Ashkar, I., Ueda, A., Sabagh, A.E., 2021. Characterization of maize hybrids (*Zea mays* L.) for detecting salt tolerance based on morpho-physiological characteristics, ion accumulation and genetic variability at early vegetative stage. *Plants* 10(11), 2549. <https://doi.org/10.3390/plants10112549>.
- IBGE, 2023. Produção agrícola municipal de culturas temporárias e permanentes. *IBGE*. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao->

- [agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques](#). Acesso em: abril de 2024.
- INSA, 2024. Delimitação do Semiárido Sergipano 2024. *Instituto Nacional do Semiárido*. <https://www.gov.br/insa/pt-br/centrais-de-conteudo/mapas/mapas-em-pdf/delimitacao-semiarido-sergipano-2024.pdf/view>. Acesso em: abril de 2024.
- IPCC, 2023. Relatório síntese. Um relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, 2023. https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: abril de 2025.
- Javed, S.A., Arif, M.S., Shahzad, S.M., Ashraf, M., Kausar, R., Farooq, T.H., Hussain, M.I., Shakoor, A., 2021. Can different salt formulations revert the depressing effect of salinity on maize by modulating plant biochemical attributes and activating stress regulators through improved N supply? *Sustainability* 13(14), 8022. <https://doi.org/10.3390/su13148022>.
- Kassambara, A., Mundt, F., 2020. Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses. *R package version 1.0.7*. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.
- Lê, S., Josse, J., Husson, F., 2008. FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *J. Stat. Softw.* 25, 1–18. <https://www.jstatsoft.org/article/view/v025i01/0>.
- Masuda, M.S., Azad, M.A.K., Hasnuzzaman, M., Arifuzzaman, M., 2021. Evaluation of salt tolerance in maize (*Zea mays* L.) at seedling stage through morphological characters and salt tolerance index. *Plant Physiology Reports*, 26(3), 419–427. <https://doi.org/10.1007/s40502-021-00611-2>.
- Novais, G.T., Machado, L.A., 2023. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. *Rev. Bras. Climatol.* 32, 1–39. <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/16163/9154>.
- Olivoto, T., Diel, M.I., Schmidt, D., Lúcio, A.D., 2022. MGIDI: a powerful tool to analyze plant multivariate data. *Plant Methods* 18(1), 121. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00952-5>.
- Olivoto, T., Lúcio, A.D., 2020. metan: An R package for multi-environment trial analysis. *Methods Ecol. Evol.* 11(6), 783–789. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13384>.
- Olivoto, T., Nardino, M., 2021. MGIDI: Toward an effective multivariate selection in biological experiments. *Bioinformatics* 37(10), 1383–1389. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaa981>.
- Paterniani, M.E.A.G.Z., et al., 2019. Estratégias de melhoramento para tolerância à seca em germoplasma de milho tropical. *Singular Meio Ambient. Agrar.* 1(1), 19–24. <https://doi.org/10.33911/singular-maa.v1i1.48>.
- Pfann, A.Z., Faria, M.V., Andrade, A.A., Nascimento, I.R., Faria, C.M.D.R., Bringhentti, R.M., 2009. Capacidade combinatória entre híbridos simples de milho em dialelo circulante. *Ciênc. Rural* 39, 635–641.

- Pratt, R.C., Velasco-Cruz, C., Darapuneni, M., Montgomery, R., Grant, L., 2021. Southwest-adapted maize germplasm as a potential genetic resource for selection of salinity tolerant cultivars. *Crop Sci.* 62(1), 286–300. <https://doi.org/10.1002/csc2.20654>.
- Rocha, D.S., Rodrigues, C.S., Gallo, P.B., Ticelli, M., Paterniani, M.E.A.G.Z., 2021. Drought tolerance in intervarietal maize hybrids. *Rev. Caatinga* 34, 80–89. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252021v34n109rc>.
- Rohman, M.M., Hossain, M.G., Omy, S.H., Methela, N.J., Molla, M.R., 2019. Evaluation of diallel crosses of maize at multilocation (*Zea mays* L.) for saline tolerance. *J. Cereals Oilseeds* 10(2), 29–42. <https://doi.org/10.5897/JCO2019.0201>.
- Ruan, Y., Li, X., Wang, Y., Jiang, S., Song, B., Guo, Z., Zhang, A., Qi, Q., Zhang, L., Fan, J., Guan, Y., Cui, Z., Zhu, Y., 2017. Photoinhibition of leaves with different photosynthetic carbon assimilation characteristics in maize (*Zea mays*). *Am. J. Plant Sci.* 8(3), 328. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.83023>.
- Shahid, M.A., Sarkhosh, A., Khan, N., Balal, R.M., Ali, S., Rossi, L., Gómez, C., Mattson, N., Nasim, W., Garcia-Sanchez, F., 2020. Insights into the physiological and biochemical impacts of salt stress on plant growth and development. *Agronomy* 10(7), 938. <https://doi.org/10.3390/agronomy10070938>.
- Silveira, J.A.G., Melo, A.R.B., Viégas, R.A., Oliveira, J.T.A., 2001. Salinity-induced effects on nitrogen assimilation related to growth in cowpea plants. *Environ. Exp. Bot.* 46(2), 171–179. [https://doi.org/10.1016/S0098-8472\(01\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0098-8472(01)00095-8).
- Silveira, J.A.G., Silva, S.L.F., Silva, E.N., Viégas, R.A., 2016. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. In: Gheyi, H.R., Dias, N.S., Lacerda, C.F., Gomes Filho, E. (Eds.), *Manejo da salinidade na agricultura: estudo básico e aplicados*. INCTSal, Fortaleza, vol. 2, pp. 181–197.
- Soares Filho, W.S., Gheyi, H.R., Brito, M.E.B., Nobre, R.G., Fernandes, P.D., Miranda, R.S., 2016. Melhoramento genético e seleção de cultivares tolerantes à salinidade. In: Gheyi, H.R., Dias, N.S., Lacerda, C.F., Gomes Filho, E. (Eds.), *Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados*. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, Fortaleza, pp. 259–274.
- Sotta, E.D., Sampaio, F.G., Marzall, K., Silva, W.G. (Orgs.), 2021. *Estratégias de adaptação às mudanças do clima dos sistemas agropecuários brasileiros*. MAPA/SENAR, Brasília.
- Stefanov, M.A., Rashkov, G.D., Yotsova, E.K., Borisova, P.B., Dobrikova, A.G., Apostolova, E.L., 2021. Different sensitivity levels of the photosynthetic apparatus in *Zea mays* L. and *Sorghum bicolor* L. under salt stress. *Plants* 10(7), 1469. <https://doi.org/10.3390/plants10071469>.
- Subramani, P., Nalliappan, G.K., Narayana, M., Veerasamy, R., Natesan, S., 2024. Selection of superior and stable fodder maize hybrids using MGIDI and MTSI indices. *Crop Breed. Appl. Biotechnol.* 24(4), e498624418. <https://doi.org/10.1590/1984-70332024v24n4a55>.
- Teixeira, P.C., Donagemma, G.K., Fontana, A., Teixeira, W.G., 2017. *Manual de métodos de análise de solo*, 3ª ed. rev. e ampl., Embrapa, Brasília.

- Valadares, F.V., Almeida, R.N., Silva, L.R.E., Santos, G.R., Pirovani, R.O.L., Souza Neto, J.D., Berilli, A.P.C.G., Moulin, M.M., Vivas, M., Berilli, S.S., Pereira, M.G., 2022. Reciprocal recurrent selection for obtaining water-deficit tolerant maize progeny. *Ciênc. Rural* 52(5), e20210162. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210162>.
- Vennam, R.R., Bheemanahalli, R., Reddy, K.R., Dhillon, J., Zhang, X., Adeli, A., 2024. Early-season maize responses to salt stress: Morpho-physiological, leaf reflectance, and mineral composition. *J. Agric. Food Res.* 15, 100994. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100994>.
- Villa, B. de et al., 2019. Efeito da salinidade no desenvolvimento inicial do milho. *Acta Iguazu* 8(3), 42–47. <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/20043>.
- Zahra, N., Raza, Z.A., Mahmood, S., 2020. Effect of salinity stress on various growth and physiological attributes of two contrasting maize genotypes. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 63, e20200072. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2020200072>.
- Zhang, H., Mu, Y., Zhang, H., Yu, C., 2023. Maintenance of stem cell activity in plant development and stress responses. *Front. Plant Sci.* 14, 1302046. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1302046>.
- Zhang, H., Yu, C., Zhang, Q., Qiu, Z., Zhang, X., Hou, Y., Zang, J., 2025. Salinity survival: molecular mechanisms and adaptive strategies in plants. *Front. Plant Sci.* 16, 1527952. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1527952>.
- Zhang, Y., Wang, Y., Xing, J., Wan, J., Wang, X., Zhang, J., Wang, X., Li, Z., Zhang, M., 2020. Copalyl diphosphate synthase mutation improved salt tolerance in maize (*Zea mays* L.) via enhancing vacuolar Na⁺ sequestration and maintaining ROS homeostasis. *Front. Plant Sci.* 11, 457. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00457>.
- Zhou, R., Kan, X., Chen, J., Hua, H., Li, Y., Ren, J., Feng, K., Liu, H., Deng, D., Yin, Z., 2019. Drought-induced changes in photosynthetic electron transport in maize probed by prompt fluorescence, delayed fluorescence, P700 and cyclic electron flow signals. *Environ. Exp. Bot.* 158, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.11.005>.
- Zia, A., Munsif, F., Jamal, A., Mihoub, A., Saeed, M.F., Fawad, M., Ahmad, I., Ali, A., 2022. Morpho-physiological attributes of different maize (*Zea mays* L.) genotypes under varying salt stress conditions. *Gesunde Pflanzen* 74(3), 661–673. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00641-2>.
- Zuffo, A.M., Steiner, F., Oliveira, A.M., Ratke, R.F., Aguilera, J.G., Santos, A.S., 2023. Tamanho de sementes e estresse hídrico e salino na germinação do milho. *Rev. Agronegócio Meio Ambient.* 17(3), e11420. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n3e11420>.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A salinidade reduziu significativamente a biomassa e a eficiência fisiológica das plantas de milho na fase juvenil, evidenciando o impacto negativo desse estresse sobre o crescimento e o metabolismo da cultura. A interação significativa entre genótipos e a salinidade demonstrou a presença de ampla variabilidade genética nas progênes avaliadas, criando oportunidades para seleção de materiais superiores.

Dentre os genótipos testados, G2 e G6 destacaram-se por seu desempenho morfofisiológico superior sob estresse salino, apresentando maior produção de biomassa, manutenção do teor relativo de água e integridade de membranas, sendo considerados promissores para ambientes salinizados.

As ferramentas multivariadas utilizadas, como a Análise de Componentes Principais (PCA) e o índice MGIDI, mostraram-se eficazes na síntese das informações e na seleção simultânea de múltiplos caracteres, sendo recomendáveis para estudos conduzidos em condições controladas, sobretudo na fase juvenil das plantas.

Recomenda-se a validação agrônômica desses resultados em condições de campo, onde as interações são mais complexas e em diferentes estádios fenológicos, a fim de confirmar a estabilidade do desempenho dos genótipos. Além disso, a inclusão de análises bioquímicas, como a atividade de enzimas antioxidantes (SOD, CAT e POD) e a quantificação de solutos osmoprotetores (prolina, glicina-betaína e açúcares solúveis), poderá aprofundar a compreensão dos mecanismos fisiológicos associados à tolerância ao sal.

Adicionalmente, destaca-se a necessidade de quantificar os teores de sódio (Na^+), potássio (K^+), cloreto (Cl^-) e da razão K^+/Na^+ em tecidos foliares e no solo, parâmetros fundamentais para avaliar a homeostase iônica e o equilíbrio nutricional sob salinidade. A integração desses dados biofísicos, bioquímicos e morfofisiológicos contribuirá para fortalecer os critérios de seleção e para o desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas do semiárido.