



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

RODRIGO RAFAEL DA SILVA

**SALINIZAÇÃO DO SOLO, CALIBRAÇÃO DO MODELO MOPECO E
TOLERÂNCIA DE SORGO SACARINO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM
ÁGUAS SALOBRAS**

MOSSORÓ

2026

RODRIGO RAFAEL DA SILVA

**SALINIZAÇÃO DO SOLO, CALIBRAÇÃO DO MODELO MOPECO E
TOLERÂNCIA DE SORGO SACARINO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM
ÁGUAS SALOBRAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Soluções para convivência com a seca e salinidade

Orientador: Prof. Dr. José Francismar de Medeiros

Co-orientador: Prof. Dra. Liz Carolina da Silva Lagos Cortes Assis

MOSSORÓ

2026

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

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi

RODRIGO RAFAEL DA SILVA

**SALINIZAÇÃO DO SOLO, CALIBRAÇÃO DO MODELO MOPECO E
TOLERÂNCIA DE SORGO SACARINO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM
ÁGUAS SALOBRAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Soluções para convivência com a seca e salinidade.

Defendida em: 27/02/ 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Francismar de Medeiros (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Francisco Vaniés da Silva Sá (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. Antônio Gustavo de Luna Souto (UFPB)
Membro Examinador

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda (UFC)
Membro Examinador

Dr. Leonardo Vieira de Souza (UNILAB)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida, pelo amor que tem por mim, que foi essencial para que eu chegasse até aqui, por ter me dado discernimento, saúde, sabedoria e ter me acolhido quando ninguém mais poderia, para que eu pudesse concluir mais essa etapa.

Toda minha família, principalmente a minha mãe Maria Rita, minha tia (mãe) Lucília da Silva, (*In Memoriam*) Sebastião Cândido, meus irmãos Geam Carlos, Joseilton Carlos, Maria Aparecida e Cidelma Nonata, pelo amor incondicional, compreensão, paciência, ensinamentos, e muita dedicação em suas orações para que Deus iluminasse e protegesse meu caminho.

A Universidade Federal do Rural do Semi-Árido (UFERSA) e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA), por ter me dado à oportunidade de fazer o mestrado e doutorado na instituição.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Norte (FAPERN) juntamente com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante todo o período. Ao Programa Institucional de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE/ CAPES) pela concessão da bolsa para o intercâmbio. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho. Ao INCT em Agricultura Sustentável no Semiárido Tropical - INCTAgriS (CNPq/Funcap/Capes) pelo apoio a infraestrutura para a realização da pesquisa.

Ao meu orientador José Francismar de Medeiros por todo conhecimento passado durante essa jornada meus sinceros agradecimentos. Centro de Investigações Agropecuárias (CIAP) do Instituto Nacional de Tecnologia Agropecuária (INTA) no setor do Instituto de Fisiología y Recursos Genéticos Vegetales (IFRGV) na província de Cordoba, Argentina em nome de Fernando Luma e Dolores Bustos. A Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes y Biotecnología de Albacete (ETSIAMB) e al Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) em nome do profesor Alfonso Domínguez Padilla.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água que, de alguma forma, contribuíram para que eu alcançasse meus objetivos.

A todos meus amigos do grupo de pesquisa do qual participo, sem eles não seria possível a realização do experimento, em especial Gabriela, Rita Magally, Amanda Cibebe,

Fagner, Isabela, Maik, Baltazar, Alex, Jessica, Franciely Carla Jamile, Darcio, Matheus e Alef, pela grande ajuda na condução do experimento.

A todos os funcionários da fazenda em nome de Fernando eu agradeço por todo o apoio durante a realização do experimento.

Aos meus grandes amigos que ganhei nesse doutorado os quais cito, Maria Isabela, Helena Maria, Renata Ramayane, Eric George, Francimar Maik, Fagner Nogueira, Romualdo, Rômulo, Terceiro, Daniele Amâncio, Gislaine, Cinthya, Baltazar, Rita Magally, Gabriela Carvalho, Alex Alvares, Wedson Alef, Jessica, Franciely. Aos amigos no qual tiver o prazer de conhecer e conviver durante os intercâmbios Fernando Luna, Dolores Bustos, Alfonso Padilla, Higino, Jota, José Antônio Martínez, Victor Davallo.

Por fim, agradeço a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a conquista de mais uma etapa acadêmica.

RESUMO GERAL

O cultivo do sorgo destaca-se como alternativa estratégica para uso eficiente dos recursos hídricos. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a homeostase iônica e a tolerância ao déficit hídrico e ao estresse salino, bem como realizar a calibração do modelo MOPECO para o sorgo sacarino BRS 506, visando contribuir para a sustentabilidade produtiva da agricultura irrigada em regiões semiáridas. Os experimentos foram conduzidos nos anos de 2021 e 2022, em delineamento de blocos casualizados, em arranjo fatorial 3×3 , com quatro repetições, combinando três níveis de salinidade da água de irrigação (1,50; 3,75 e 6,00 dS m^{-1}) e três lâminas de irrigação (100%, 75% e 50% da ET_c), correspondendo aos déficits D0, D25 e D50. Foram avaliados atributos químicos do solo: pH, condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes), relação de adsorção de sódio (RAS), porcentagem de sódio trocável (PST), concentrações e acúmulo de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} em raízes, colmos e folhas, parâmetros fisiológicos relacionados ao estado hídrico, biomassa e produção de caldo. O aumento da salinidade da água promoveu elevação da CEes, RAS e PST, indicando acúmulo progressivo de sais e potencial de sodificação do solo. Observou-se maior retenção de Na^+ nas raízes, evidenciando eficiente mecanismo de compartimentação iônica e manutenção da homeostase, com baixos incrementos na parte aérea. O estresse salino reduziu o teor relativo de água e aumentou o extravasamento de eletrólitos, especialmente sob maior salinidade, porém a produção total foi pouco afetada. A redução de 25% na lâmina de irrigação resultou em perdas produtivas discretas, indicando aumento da eficiência do uso da água, enquanto o déficit de 50% ocasionou reduções mais expressivas. O modelo MOPECO apresentou desempenho satisfatório na simulação do rendimento até a salinidade de 3,75 dS m^{-1} , demonstrando ser ferramenta válida para manejo da irrigação deficitária. Conclui-se que o sorgo sacarino BRS 506 apresenta elevada resiliência ao estresse salino e moderada tolerância ao déficit hídrico, sustentada por mecanismos eficientes de homeostase iônica e manutenção produtiva, e que o modelo MOPECO constitui ferramenta promissora para otimização do manejo da irrigação em ambiente semiárido.

Palavras-chave: Estresse hídrico, MOPECO, Rendimento de açúcares, *Sorgo bicolor*

ABSTRACT

The cultivation of sorghum stands out as a strategic alternative for the efficient use of water resources. This study aimed to evaluate ionic homeostasis and tolerance to water deficit and salt stress, as well as to calibrate the MOPECO model for sweet sorghum BRS 506, contributing to the productive sustainability of irrigated agriculture in semiarid regions. The experiments were conducted in 2021 and 2022 using a randomized block design in a 3×3 factorial arrangement with four replications, combining three irrigation water salinity levels (1.50, 3.75, and 6.00 dS m⁻¹) and three irrigation depths (100%, 75%, and 50% of ET_c), corresponding to deficits D0, D25, and D50. The following soil chemical attributes were evaluated: pH, electrical conductivity of the soil saturation extract (EC_{se}), sodium adsorption ratio (SAR), exchangeable sodium percentage (ESP), concentrations and accumulation of Na⁺, K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ in roots, stems, and leaves, physiological parameters related to plant water status, biomass, and broth production. Increased irrigation water salinity promoted higher EC_{se}, SAR, and ESP values, indicating progressive salt accumulation and soil sodification potential. Greater Na⁺ retention was observed in the roots, demonstrating an efficient ionic compartmentalization mechanism and maintenance of homeostasis, with low increases in the shoot. Salt stress reduced relative water content and increased electrolyte leakage, especially under higher salinity levels; however, total production was only slightly affected. A 25% reduction in irrigation depth resulted in minor yield losses, indicating improved water use efficiency, whereas a 50% deficit caused more pronounced reductions. The MOPECO model showed satisfactory performance in simulating yield up to a salinity level of 3.75 dS m⁻¹, demonstrating its validity as a tool for deficit irrigation management. It was concluded that sweet sorghum BRS 506 exhibits high resilience to salt stress and moderate tolerance to water deficit, supported by efficient ionic homeostasis mechanisms and productive maintenance, and that the MOPECO model constitutes a promising tool for optimizing irrigation management in semiarid environments.

Keywords: Water stress, MOPECO, Yield of sugars, *Sorghum bicolor*.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I SALINIZAÇÃO DO SOLO E HOMEOSTASE IÔNICA EM SORGO SACARINO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM ÁGUAS SALOBRAS

Figura 1. Temperatura média do ar (A), Umidade relativa do ar (B), Radiação global (C) e Evapotranspiração de referencia - ETo (D) para o ciclo de plantio de 2022 registrada na área durante os experimentos.

.....49

Figura 2. Lâmina de irrigação diária aplicada para o tratamento D0 sem déficit hídrico para cultivar de sorgo cv. BRS 506 para o ciclo de plantio de 2022 no município de Upanema, RN.....

.51 **Figura 3.** Condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes, dSm⁻¹), relação de adsorção de sódio do extrato de saturação (RASEs, (mmol L⁻¹)^{0,5}) e porcentagem de sódio trocável (PST, %) para condições de estresse salino (A) e condutividade elétrica do extrato de saturação do solo e porcentagem de sódio trocável (B) condições de déficit hídrico.....54

Figura 4. Concentração dos íons sódio (A), potássio (B), cálcio (C), relação potássio/sódio (D), cálcio/sódio (E) e magnésio/sódio (F) na raiz, caule e folha da cultivar de sorgo BRS 506 submetida as condições de estresse salino.....56

Figura 5. Concentração dos íons sódio nas raízes (A), magnésio na folha (B) e das relações cálcio/sódio, magnésio/sódio e potássio/sódio nas raízes (C) da cultivar de sorgo BRS 506 submetida as condições de déficit hídrico.....58

Figura 6. Concentrações de magnésio na raiz (A), sódio no caule (B), cálcio no caule (C), relação cálcio/sódio no caule (D) no sorgo cv. BRS 506 submetido as condições de estresse salino e déficit hídrico.....59

Figura 7. Acúmulo de sódio nas raízes em relação acúmulo total na planta para cultivar de sorgo BRS 506 submetida as condições de estresse salino e déficit hídrico.....62

Figura 8. Biomassa (A) e acúmulo em relação ao total na planta dos íons sódio, cálcio, potássio e magnésio nas raízes (B), caule (C) e folha (D) para cultivar de sorgo BRS 506

submetida	as	condições	de	estresse
salino.....				63

CAPÍTULO II TOLERÂNCIA DO SORGO SACARINO (*Sorghum bicolor*) AO DÉFICIT HÍDRICO E À SALINIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO: RELAÇÕES HÍDRICAS E PRODUÇÃO

Figura 1. A temperatura média do ar (A), a umidade relativa (B), a radiação global (C) e a evapotranspiração de referência (ET_o) (D) foram registradas durante os dois ciclos de plantio (2021 e 2022) no local experimental..... 83

Figura 2. Lâminas diárias de irrigação aplicadas à cultivar de sorgo *BRS 506* nos dois ciclos de plantio, 2021 e 2022, no município de Upanema, RN.....85

Figura 3. Vazamento de eletrólitos (A), teor relativo de água (B), déficit de saturação hídrica (C) e capacidade de absorção de água (D) na cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de estresse salino. médias seguidas pela mesma letra 'a-b', dentro de cada ano, não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$).
.....88

Figura 4. Vazamento de eletrólitos (A), teor relativo de água (B), déficit de saturação hídrica (C) e capacidade de absorção de água (D) na cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra 'a-b' dentro de cada ano não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$).
.....90

Figura 5. Capacidade de retenção de água (CRA) da cultivar de sorgo *BRS 506* na safra de 2022 sob condições combinadas de déficit hídrico e estresse salino. Médias seguidas pela mesma letra minúscula 'a-b' (comparação dos níveis de salinidade dentro de cada déficit hídrico) e pela letra maiúscula 'A' (comparação dos déficits hídricos dentro de cada nível de salinidade) não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).
.....91

Figura 6. Teor de massa seca (A) e rendimento de caldo (B) da cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de estresse salino. Médias seguidas pela mesma letra 'a-b' não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$).
.....92

Figura 7. Produtividade total (A), produtividade de massa seca (B), produtividade de colmos (C) e produtividade de caldo (D) da cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra 'a-b' não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 14$).
.....93

CAPITULO III CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MOPECO PARA O CULTIVO DO SORGO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO E SALINIDADE PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Figura 1. Irrigação acumulada para os tratamentos durante os experimentos de 2021 e 2022.
.....109

Figura 2. Evolução do coeficiente de cultura (K_c) e coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico da planta (K_y) ao longo do ciclo da cultura.
.....112

Figura 3. Relação ET_a/ET_m em cada etapa de K_y para as condições de salinidade S1 (A e B), S2 (C e D) e S3 (E e F) nos experimentos de 2021 e 2022 para as diferentes condições de déficit hídrico.....114

Figura 4. Relação do rendimento simulado verso o observado (Y_a/Y_o) (A), Rendimento observado 2021(B) e 2022 (C).....115

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I SALINIZAÇÃO DO SOLO E HOMEOSTASE IÔNICA EM SORGO SACARINO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM ÁGUAS SALOBRAS

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo na área de estudo antes do experimento.....	48
Tabela 2. Resumo da análise de variância dos índices de salinidade do solo irrigado com água salina (S) e déficit de água (D).....	53
Tabela 3. Resumo da análise de variância da compartimentação dos íons para cultivar de sorgo BRS 506 em condições de estresse salino e déficit hídrico.....	55
Tabela 4. Resumo da análise de variância do conteúdo íons acumulado na compartimentação da cultivar de sorgo BRS 506 em condições de estresse salino e déficit hídrico.....	61

CAPÍTULO II TOLERÂNCIA DO SORGO SACARINO (*Sorghum bicolor*) AO DÉFICIT HÍDRICO E À SALINIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO: RELAÇÕES HÍDRICAS E PRODUÇÃO

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo na área de estudo antes do experimento.....	82
Tabela 2. Resumo da análise de variância para extravasamento de eletrólitos (EL), teor relativo de água (RWC), déficit de saturação hídrica (WSD), capacidade de retenção de água (WRC) e capacidade de absorção de água (WUC) da cultivar <i>BRS 506 de Sorghum bicolor</i> durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico e estresse salino.....	87
Tabela 3. Resumo da ANOVA da análise conjunta para produtividade total, produtividade de massa seca (produtividade de MS), produtividade de colmo e produtividade de caldo, bem como o teor médio de massa seca da planta inteira (MSC), teor de massa seca do colmo (TMSC) e teor de caldo, para as safras de 2021 e 2022 do sorgo <i>BRS 506</i> sob condições de déficit hídrico e estresse salino.....	92

Tabela 4. Valores médios de produção de rendimento total, massa seca, colmo, massa de caldo e teor de caldo para a cultivar de sorgo *BRS 506* no ciclo de cultivo de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico e estresse salino.....94

CAPITULO III CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MOPECO PARA O CULTIVO DO SORGO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO E SALINIDADE PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tabela 1. Valores da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo real e estimada pelo modelo MOPECO ao longo do período de experimento de 2021 e 2022 para as diferentes condições de estresse salino.....113

Tabela 2. Estatística para os dois anos de experimento.....116

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
CAPÍTULO I. SALINIZAÇÃO DO SOLO E HOMEOSTASE IÔNICA EM SORGO SACARINO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM ÁGUAS SALOBRAS	45
RESUMO	45
ABSTRACT.....	46
1. INTRODUÇÃO.....	47
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	48
2.1. Salinidade e fertilidade do solo	51
3. RESULTADOS.....	52
3.1. Efeito da salinidade e déficit hídrico nas características do solo	52
3.2. Homeostase iônica.....	54
3.3. Homeostase no déficit hídrico	57
3.4. Biomassa e acúmulo de íons.....	60
4. DISCUSSÃO	64
4.2. Efeito do estresse hídrico salino na homeostase iônica das plantas	65
4.3. Homeostase no déficit hídrico	68
4.4. Interação salinidade versus déficit hídrico	69
4.5. Biomassa e conteúdo mineral na planta	71
5. CONCLUSÕES.....	72
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
CAPÍTULO II. TOLERÂNCIA DO SORGO SACARINO (<i>Sorghum bicolor</i>) AO DÉFICIT HÍDRICO E À SALINIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO: RELAÇÕES HÍDRICAS E PRODUÇÃO	78
RESUMO	78
ABSTRACT.....	79
1. INTRODUÇÃO.....	80
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
3. RESULTADOS	87
3.1 Efeitos dos estresses salino e hídrico nas relações hídricas das plantas.....	87
3.2 Efeito da salinidade na produtividade	92

3.3	Efeito do estresse hídrico na produtividade.....	93
4.	DISCUSSÃO.....	94
5.	CONCLUSÃO.....	98
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
CAPITULO III- CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MOPECO PARA O CULTIVO DO SORGO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO E SALINIDADE PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO		105
	RESUMO	105
	ABSTRACT.....	106
1.	INTRODUÇÃO.....	107
2.	MATERIAL E MÉTODOS.....	108
2.1	Apresentação do modelo	110
2.2	Calibração e validação da relação rendimentos versus déficit hídricos e salinidades.	111
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	112
4	CONCLUSÕES.....	116
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

INTRODUÇÃO GERAL

Mundialmente cresce a demanda por alimentos e a agricultura atualmente enfrenta desafios relacionados as mudanças climáticas com a intensificação da escassez hídrica (Yuan *et al.*, 2024). Estima-se que 70% do consumo global de água doce é utilizada pela agricultura irrigada (UNESCO, 2024). Nesse sentido, é necessário a busca por estratégias que promovam maior eficiência da irrigação sem comprometer a produtividade das culturas agrícolas.

O semiárido Brasileiro é caracterizado por elevadas taxas de evapotranspiração, altas temperaturas, irregularidade na precipitação e limitação na quantidade e qualidade da água para irrigação, que compromete o desenvolvimento e o desempenho das culturas (Lindoso *et al.*, 2018). Nesse ambiente, os estresses abióticos, particularmente a salinidade e o déficit hídrico, são os principais fatores limitantes para a produtividade das culturas (Islam *et al.*, 2023; Punia *et al.*, 2020). Em regiões onde a disponibilidade de água é limitada e a água de irrigação é frequentemente de baixa qualidade (ou seja, salobra ou salina), as plantas que toleram tais condições são especialmente valiosas (Calone *et al.*, 2020; Islam *et al.*, 2023).

Nesse sentido, o sorgo que é classificado como moderadamente tolerante à salinidade, com limiares críticos de $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ para água de irrigação e $6,8 \text{ dS m}^{-1}$ para salinidade do solo (Francois; Donovan; Maas, 1984). Níveis de salinidade que excedem esses limiares estão associados a reduções de rendimento de aproximadamente 16% por unidade de aumento na salinidade do solo (Tanji; Kielen, 2002). Essas características ressaltam a importância estratégica do cultivo de sorgo em áreas afetadas pela escassez hídrica e salinização.

O sorgo destaca-se por sua rusticidade e elevada capacidade de adaptação a estresses abióticos, inclusive salinidade e déficit hídrico (Kaplan *et al.*, 2019). A cultivar BRS 506 apresenta características agronômicas promissoras que demonstram sua resposta fisiológica e produtiva sob condições simultâneas de déficit hídrico e salinidade (Queiroz *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2024), com resultados promissores nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro.

Diante desse cenário, modelos de simulação são ferramentas essenciais ao planejamento hídrico em sistemas irrigados. Essa ferramenta é capaz de estimar as produtividades de acordo com a lâmina de irrigação a ser aplicada, buscando maximizar a rentabilidade das áreas irrigadas, situadas em zonas áridas e semiáridas com escassez de recursos hídricos, através do uso estratégico de irrigação deficitária controlada (DOMINGUEZ *et al.*, 2012), considerando uma superfície irrigada disponível (LOPEZ-MATA *et al.*, 2010). Na Espanha pesquisas vem sendo desenvolvidas utilizando o modelo MOPECO (Modelo de Optimización Económica del

Riego) na calibração previamente para diversas culturas como cevada (Pardo *et al.*, 2020), milho (Domínguez *et al.*, 2012b, 2022), cebola (Domínguez *et al.*, 2012a), alho (Domínguez *et al.*, 2013; Cortés *et al.*, 2003), melão (Leite *et al.*, 2015) e batata (Martínez-Romero *et al.*, 2019). No entanto, é necessária a calibração e validação do modelo para outras culturas, incluindo o sorgo, para um melhor planejamento e otimização da irrigação, particularmente para as condições do semiárido brasileiro, onde também é frequente o problema de salinidade no solo e na água de irrigação.

A calibrado do modelo MOPECO para diferentes culturas tinha como principal limitação a ausência de um módulo de salinidade, que impedia de realizar simulação com água salina usada na irrigação. No entanto, (Domínguez *et al.*, 2011) propuseram a criação do Modelo MOPECO - Sal para ser usado na simulação de água de baixa salinidade, criando um módulo que permite indicar estratégia de irrigação para condições não ideais. Em meio à necessidade de integração dos conhecimentos fisiológicos e de modelagem agrícola, torna-se necessário realizar a calibração, aplicar o modelo para diversas culturas em ambientes semiáridos e ajustar esse modelo ao manejo eficiente da irrigação do sorgo. Assim, esta pesquisa propõe avaliar a homeostase iônica e a tolerância sob déficit hídrico e estresse salino, bem como realizar a calibração do modelo MOPECO para o sorgo sacarino BRS 506, visando contribuir para a sustentabilidade produtiva da agricultura irrigada em regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALONE, R.; SANOUBAR, R.; LAMBERTINI, C.; SPERANZA, M.; VITTORI ANTISARI, L.; VIANELLO, G.; BARBANTI, L. Salt Tolerance and Na Allocation in Sorghum bicolor under Variable Soil and Water Salinity. **Plants**, v. 9, n. 5, p. 561, 2020.
- CORTÉS, C. F.; MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; LÓPEZ URREA, R. Production of garlic (*Allium sativum* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 2, p. 155–167, 2003.
- DOMÍNGUEZ, A.; JIMÉNEZ, M.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; LEITE, K. N. Simulation of onion crop behavior under optimized regulated deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 113, p. 64–75, 2012a.

- DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ, R. S.; DE JUAN, J. A.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; TARJUELO, J. M. Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 42–53, 2012b.
- DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; LEITE, K. N.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A.; LÓPEZ-URREA, R. Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic growing in central Spain. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 154–167, 2013.
- DOMÍNGUEZ, A.; SCHWARTZ, R. C.; PARDO, J. J.; GUERRERO, B.; BELL, J. M.; COLAIZZI, P. D.; LOUIS BAUMHARDT, R. Center pivot irrigation capacity effects on maize yield and profitability in the Texas High Plains. **Agricultural Water Management**, v. 261, p. 107335, 2022.
- DOMÍNGUEZ, A.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A.; LÓPEZ-MATA, E.; BREIDY, J.; KARAM, F. Deficit irrigation under water stress and salinity conditions: The MOPECO-Salt Model. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1451–1461, 2011.
- FRANCOIS, L. E.; DONOVAN, T.; MAAS, E. V. Salinity Effects on Seed Yield, Growth, and Germination of Grain Sorghum¹. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 5, p. 741–744, 1984.
- ISLAM, M. S.; HASAN, Md. K.; ISLAM, Md. R.; CHOWDHURY, Md. K.; PRAMANIK, M. H.; IQBAL, M. A.; RAJENDRAN, K.; IQBAL, R.; SOUFAN, W.; KAMRAN, M.; LIYUN, L.; EL SABAGH, A. Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA3). **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 11, p. 1048768, 2023.
- ISLAM, R. M.; HOSSAIN, M. F.; HOSSAIN, J.; GOLAM AZAM, M.; MASUMA AKHTER, M.; KAMRUL HASAN, M.; AL-ASHKAR, I.; F. ALMUTAIRI, K.; EL SABAGH, A.; ATIKUR RAHMAN, M.; AAMIR IQBAL, M.; SOHIDUL ISLAM, M. Drought Tolerance in Mung Bean is Associated with the Genotypic Divergence, Regulation of Proline, Photosynthetic Pigment and Water Relation. **Phyton- International Journal of Experimental Botany**, v. 92, n. 3, p. 955–981, 2023.
- KAPLAN, M.; KARA, K.; UNLUKARA, A.; KALE, H.; BUYUKKILIC BEYZI, S.; VAROL, I. S.; KIZILSIMSEK, M.; KAMALAK, A. Water deficit and nitrogen affects yield and feed value of sorghum sudangrass silage. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 30–36, 2019.

LEITE, K. N.; CABELLO, M. J.; VALNIR JÚNIOR, M.; TARJUELO, J. M.; DOMÍNGUEZ, A. Modelling sustainable salt water management under deficit irrigation conditions for melon in Spain and Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 11, p. 2307–2318, 2015.

LINDOSO, D. P.; EIRÓ, F.; BURSZTYN, M.; RODRIGUES-FILHO, S.; NASUTI, S. Harvesting Water for Living with Drought: Insights from the Brazilian Human Coexistence with Semi-Aridity Approach towards Achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainability**, v. 10, n. 3, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/622>. Acesso em: 25 fev. 2026.

MARTÍNEZ-ROMERO, A.; DOMÍNGUEZ, A.; LANDERAS, G. Regulated deficit irrigation strategies for different potato cultivars under continental Mediterranean-Atlantic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 164–176, 2019.

PARDO, J. J.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; LÉLLIS, B. C.; TARJUELO, J. M.; DOMÍNGUEZ, A. Effect of the optimized regulated deficit irrigation methodology on water use in barley under semiarid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105925, 2020.

PUNIA, H.; TOKAS, J.; BHADU, S.; MOHANTY, A. K.; RAWAT, P.; MALIK, A.; SATPAL. Proteome dynamics and transcriptome profiling in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under salt stress. **3 Biotech**, v. 10, n. 9, p. 412, 2020.

QUEIROZ, G. C. M.; DE MEDEIROS, J. F.; DA SILVA, R. R.; DA SILVA MORAIS, F. M.; DE SOUSA, L. V.; DE SOUZA, M. V. P.; DA NÓBREGA SANTOS, E.; FERREIRA, F. N.; DA SILVA, J. M. C.; CLEMENTE, M. I. B.; DE CASTRO GRANJEIRO, J. C.; DE ARAÚJO SALES, M. N.; CONSTANTE, D. C.; NOBRE, R. G.; DA SILVA SÁ, F. V. Growth, Solute Accumulation, and Ion Distribution in Sweet Sorghum under Salt and Drought Stresses in a Brazilian Potiguar Semiarid Area. **Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 803, 2023.

SOUSA, L. V. D.; DA SILVA, R. R.; PIRES DE SOUZA, M. V.; CARVALHO MAIA DE QUEIROZ, G.; BATISTA CLEMENTE, M. I.; DE MEDEIROS, J. F. Effects of saline and water stress on sweet sorghum. **DYNA**, v. 91, n. 231, p. 69–75, 2024.

TANJI, K. K.; KIELEN, N. C. **Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002. (FAO irrigation and drainage paper, v. 61).

UNESCO. **Statistics | UN World Water Development Report**. 2024. Disponível em: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/s>. Acesso em: 25 fev. 2026.

YUAN, X.; LI, S.; CHEN, J.; YU, H.; YANG, T.; WANG, C.; HUANG, S.; CHEN, H.; AO, X. Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. **Agronomy**, v. 14, n. 7, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/7/1360>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CAPÍTULO I. SALINIZAÇÃO DO SOLO E HOMEOSTASE IÔNICA EM SORGO SACARINO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM ÁGUAS SALOBRAS

RESUMO

O semiárido brasileiro apresenta acentuado déficit hídrico, além da frequente salinidade elevada das águas, especialmente de poços. Nesse contexto, tornam-se essenciais estudos com culturas adaptadas ao estresse hídrico e salino. O objetivo é avaliar a salinidade do solo a homeostase iônica do sorgo sacarino BRS 506 em resposta ao déficit hídrico e ao estresse salino em região semiárida do Brasil. Foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, em arranjo fatorial 3×3 e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em três níveis de salinidade da água de irrigação (1,50, 3,75 e 6,00 dS m⁻¹) e três níveis de déficit hídrico (D0, D50 e D25 %ETc). O ensaio teve a duração de xxx dias e, ao final, foram avaliados os seguintes atributos do solo: pH, condutividade elétrica (CEes) e relação de adsorção de sódio (RAS) do extrato de saturação do solo, além da porcentagem de sódio trocável. Na planta foram realizadas determinação das concentrações de Na, K, Ca, Mg nas raízes, caule e folha, bem como a produção de biomassa. Os valores de CEes variaram de 1,90 a 5,32 dS m⁻¹, com aumentos expressivos na RAS de 1,13 para 6,28 (mmol L⁻¹)^{0,5}) e na PST de 6,88% para 26,59%, correspondendo a acréscimos de 179,66%, 456,28% e 286,44%, respectivamente, comparando-se os tratamentos de maior e menor salinidade. A irrigação com água salina promoveu um acúmulo significativo de íon Na⁺ nas raízes e caules, com destaque para a raiz com valores de 3,33, 6,03 e 6,88 g kg⁻¹ para CEa de 1,5, 3,8 e 6,0 dS m⁻¹ respectivamente. Os resultados indicam que aumento da salinidade da água de irrigação resulta em acúmulo progressivo de sal e eleva s riscos de sodificação. O sorgo demonstrou eficiente retenção Na⁺ nas raízes quando submetido ao estresse salino de 3,8 e 6,0 dS m⁻¹. O mecanismo de compartimentação mostrou-se eficiente na homeostase iônica do sorgo cv. BRS 506.

PALAVRAS CHAVES: *Sorghum bicolor* (L.) Moench, Estresse salino, estresse hídrico, acúmulo de íons

CHAPTER I. SOIL SALINIZATION AND IONIC HOMEOSTASIS IN SWEET SORGHUM UNDER DEFICIT IRRIGATION WITH BRACKISH WATER

ABSTRACT

The Brazilian semiarid region presents severe water deficit conditions, in addition to the frequent occurrence of high salinity in water sources, especially groundwater from wells. In this context, studies involving crops adapted to water and salt stress are essential. This study aimed to evaluate soil salinity and the ionic homeostasis of sweet sorghum BRS 506 in response to water deficit and salt stress under semiarid conditions in Brazil. The experiment was conducted using a randomized block design in a 3×3 factorial arrangement with four replications. Treatments consisted of three irrigation water salinity levels (1.50, 3.75, and 6.00 dS m⁻¹) and three levels of water deficit (D0, D25, and D50 %ETc). The experiment lasted 92 days and, at the end, the following soil attributes were evaluated: pH, electrical conductivity of the soil saturation extract (ECse), sodium adsorption ratio (SAR), and exchangeable sodium percentage (ESP). In the plants, the concentrations of Na, K, Ca, and Mg were determined in roots, stems, and leaves, as well as biomass production. ECse values ranged from 1.90 to 5.32 dS m⁻¹, with expressive increases in SAR from 1.13 to 6.28 (mmol L⁻¹)^{0.5} and in ESP from 6.88% to 26.59%, corresponding to increases of 179.66%, 456.28%, and 286.44%, respectively, when comparing the highest and lowest salinity treatments. Irrigation with saline water promoted significant accumulation of Na⁺ ions in roots and stems, especially in the roots, with values of 3.33, 6.03, and 6.88 g kg⁻¹ for ECw levels of 1.5, 3.8, and 6.0 dS m⁻¹, respectively. The results indicate that increasing irrigation water salinity leads to progressive salt accumulation and increases the risks of soil sodification. Sorghum showed efficient Na⁺ retention in the roots under salt stress conditions of 3.8 and 6.0 dS m⁻¹. The compartmentalization mechanism proved to be efficient in maintaining ionic homeostasis in sorghum cv. BRS 506.

Keywords: *Sorghum bicolor* (L.) Moench, salt stress, water stress, and ion accumulation.

1. INTRODUÇÃO

O estresse salino, associado ao déficit hídrico, é um dos principais fatores que impactam a produtividade agrícola em todo mundo (Abuslima *et al.*, 2022). Estima-se que cerca de um bilhão de hectares de terras com presença de salinidade já são afetadas pela salinidade no mundo dificultando a produção agrícola em áreas críticas (Karumanchi *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). Diante disso, o acompanhamento da salinidade do solo e o acúmulo de sais ao longo do período de cultivo tornam-se essenciais. A salinidade do solo pode apresentar tendência de flutuação, em vez de aumento contínuo ao longo dos anos, estando essas variações intimamente relacionadas à quantidade relativa de irrigação e à precipitação durante o período chuvoso (Wang *et al.*, 2023).

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) destaca-se por sua rusticidade e elevada capacidade de adaptação a estresses abióticos, inclusive salinidade e déficit hídrico (Kaplan *et al.*, 2019). Quando comparado a outras culturas, como cevada (*Hordeum vulgare*), trigo (*Triticum*) e milho (*Zea mays*); o sorgo apresenta crescimento mais acentuado tanto da parte aérea quanto do sistema radicular, com maior número de raízes em condições de déficit hídrico (Zheng *et al.*, 2024). Essas características conferem maior resistência ao déficit hídrico, permitindo à planta explorar camadas mais profundas do solo para extração de água.

No sorgo, como outras gramíneas, a exclusão de sal constitui o principal mecanismo de tolerância à salinidade, ocorrendo por meio da limitação do influxo de sódio (Na^+), o aumento do efluxo, acúmulo no parênquima do xilema das raízes ou compartimentalização em vacúolos (Munns; Tester, 2008; Wang *et al.*, 2023). Esses mecanismos reduzem o transporte de Na^+ para as folhas, reduzindo o impacto sobre aparato fotossintético, favorecendo a produção e a sobrevivência da planta (Ukwatta *et al.*, 2021).

A tolerância das plantas ao estresse salino está associada à capacidade de manter a homeostase iônica, restringindo a entrada de íons tóxicos, como Na^+ e Cl^- , ou promovendo sua exclusão ou compartimentalização no vacúolo celular por meio de transportadores e canais específicos, presentes na membrana plasmática e no tonoplasto (Liu; Jiang; Yuan, 2024). Ambientes com elevada concentração de Na^+ na solução do solo podem resultar na menor absorção de K^+ , comprometendo o equilíbrio iônico intracelular (Zheng *et al.*, 2024). Dessa forma, plantas tolerantes à salinidade minimizam a toxicidade iônica ao manter baixos níveis de Na^+ nos tecidos e uma elevada razão $\text{K}^+:\text{Na}^+$ (Souto *et al.*, 2023).

A via regulatória de sensibilidade excessiva ao sal (SOS) desempenha papel fundamental na manutenção da homeostase iônica, ao modular a atividade de antiportadores

$\text{Na}^+:\text{H}^+$ e contribuir para a exclusão ou compartimentalização de Na^+ sob condições de estresse salino (Park; Kim; Yun, 2016). Durante esse estresse, a homeostase $\text{Na}^+:\text{K}^+$ precisa ser ajustada para manter uma alta proporção $\text{K}^+:\text{Na}^+$, evitando a deficiência de K^+ (ZHAO *et al.*, 2021). Além disso, aquaporinas também participam da regulação do equilíbrio hídrico e iônico, controlando a absorção de água pelas raízes, a transpiração foliar, o fechamento estomático e o transporte de pequenas moléculas (Gautam; Pandey, 2021). A superexpressão da aquaporina TdPIP2;1 em trigo (*Triticum*), por exemplo, contribui para a manutenção de uma baixa relação $\text{Na}^+:\text{K}^+$ sob condições de elevado estresse salino (AYADI *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2021).

O sorgo BRS 506 apresenta capacidade de tolerância ao estresse salino combinado ao déficit hídrico, utilizando a compartimentação do íon tóxico Na^+ nas raízes e caule da planta? Buscando responder essa questão, o presente estudo teve como objetivo avaliar a salinidade do solo e a homeostase iônica do sorgo sacarino BRS 506 em resposta ao déficit hídrico e ao estresse salino em região semiárida do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no período de setembro a dezembro de 2022 no sítio Cumaru, localizado no município de Upanema, no Rio Grande do Norte, Brasil, (Latitude 5° 33' 30" S, Longitude 37° 11' 56" O, e altitude de 110 m acima do nível do mar. O solo da área experimental é classificado como Cambissolo Háptico, com profundidade efetiva de aproximadamente 0,6 m. As propriedades físico-químicas do solo para as camadas avaliadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo na área de estudo antes do experimento.

Prof	pH	EC _{es}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CT _C	RAS _{es}	PST	P
m		dS m ⁻¹			cmolc dm ⁻³			(mmol L ⁻¹) ^{0,5}	%	mg dm ⁻³
0-40	7,35	0,85	0,95	1,55	0,37	0,46	7,33	0,29	5,05	4,75
			Areia	Silte	Argila					
					g kg ⁻¹					
0-40		220		48	732					

O clima segundo a classificação de Köppen é BSh, ou seja, o semiárido muito quente, com precipitação anual média de 633 mm nos últimos 30 anos, concentrada nos meses de fevereiro a maio, e temperatura média anual de 26°C (EMPARN, 2022). Durante o experimento

os dados climáticos foram coletados numa estação meteorologia instalada ao lado do local da área experimental (Figura 1), não ocorrendo precipitação durante todo o ciclo da cultura.

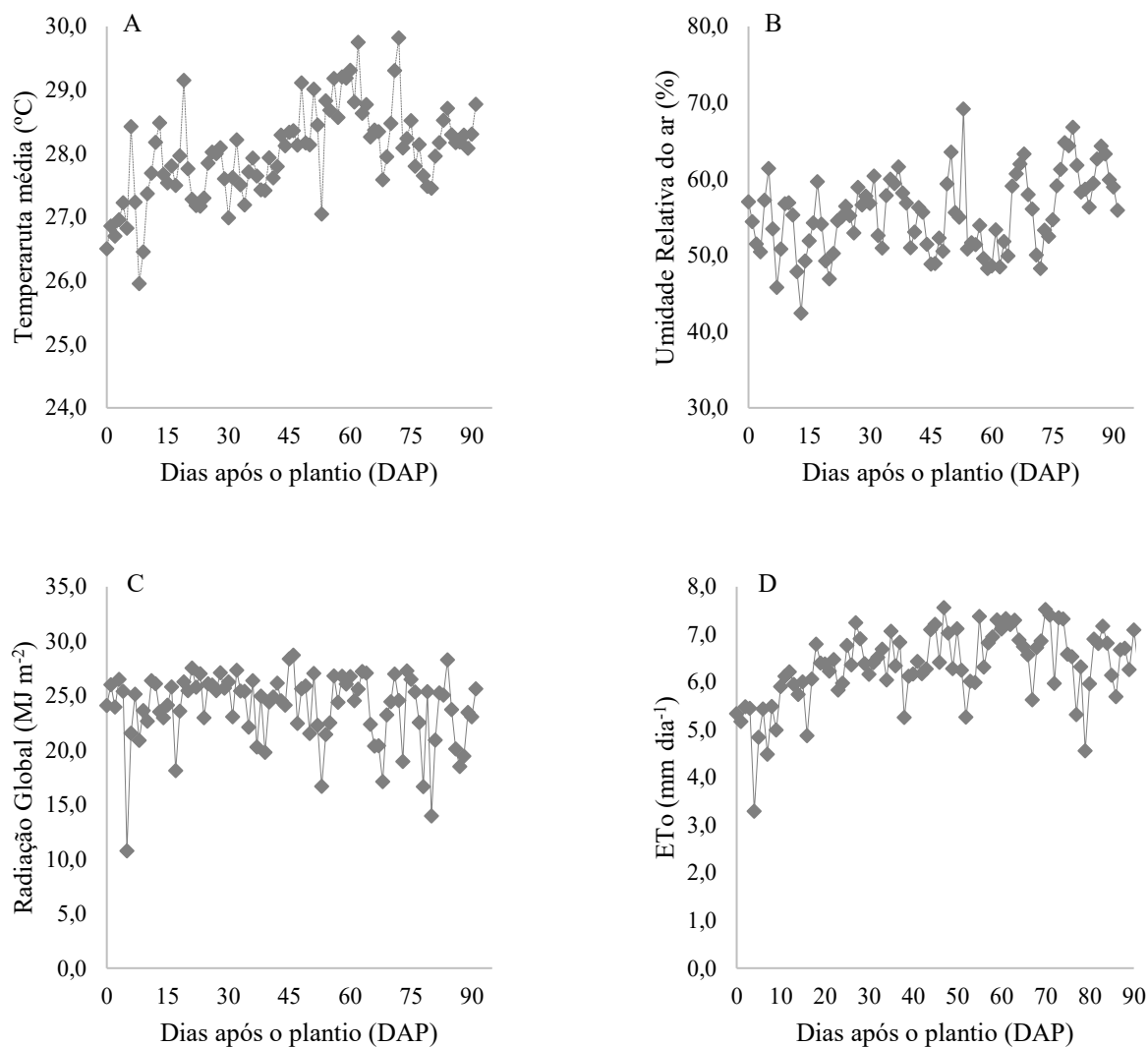


Figura 1. Temperatura média do ar (A), Umidade relativa do ar (B), Radiação global (C) e Evapotranspiração de referencia - ET₀ (D) para o ciclo de plantio de 2022 registrada na área durante os experimentos.

A cultivar de sorgo utilizada neste estudo foi a *BRS 506*, desenvolvida pela Embrapa Milho e Sorgo para servir como matéria-prima alternativa complementar à cana-de-açúcar para a produção de etanol. Esta cultivar tem um ciclo de crescimento anual de 120 a 130 dias, atinge uma altura média de 280 cm e produz um rendimento médio de colmo variando de 40 a 60 Mg ha⁻¹, com rendimentos de matéria seca entre 15 e 20 Mg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2012).

Antes da instalação dos experimentos, a área foi preparada através de uma aração seguida de gradagem, abertura dos sulcos de plantio e realizado a adubação de fundação com 150 kg ha^{-1} de fosfato monoamônico MAP (11-52) nitrogênio e fósforo respectivamente. A adubação foi realizada de acordo com as recomendações da análise do solo e das exigências nutricionais da cultura (Malavolta; Rosolem, 1981). A semeadura foi realizada com uma plantadeira manual, colocando 20 sementes por metro linear. O desbaste foi realizado 15 dias após a plantio deixando 10 plantas por metro linear, no espaçamento em fileiras duplas $1,35 \times 0,25 \times 0,10 \text{ m}$. Foram realizadas duas capinas manuais para o controle das ervas daninhas durante o ciclo da cultura. Na fertirrigação aplicou-se 70 kg ha^{-1} de N empregando-se como fonte a ureia (45% de N). Para suprir a demanda do potássio foi aplicado 30 kg ha^{-1} de K_2O , usando como fertilizante o KCl (60% de K_2O). As fertirrigações foram realizadas aos 21; 28 e 35 dias após o plantio, usando uma terça parte de cada fertilizante por aplicação.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 3×3 , com quatro repetições: três níveis de salinidades da água de irrigação (1,50, 3,75 e $6,00 \text{ dS m}^{-1}$) e três lâminas de irrigação (50, 75 e 100% da evapotranspiração da cultura - ET_{ca} , considerando uma eficiência de irrigação de 95%, correspondendo aos déficits de irrigação de D50, D25 e D0% da ET_{c}), constituindo-se em 9 tratamentos, totalizando 36 parcelas experimentais. As unidades experimentais foram constituídas de duas fileiras duplas de 7,0 m, sendo a área útil as duas fileiras internas, eliminando-se 1,5 m das extremidades.

A água com menor nível de salinidade ($1,5 \text{ dS m}^{-1}$) foi oriunda do poço tubular e a água de maior salinidade ($6,0 \text{ dS m}^{-1}$) foi definida com base na tolerância à salinidade da cultura do sorgo para rendimento de 60% do seu potencial produtivo (Ayers; Westcot, 1999). Para obtenção dos dois maiores níveis de salinidade, foram preparadas soluções estoque na concentração de 200 g L^{-1} de NaCl ($3,42 \text{ mol L}^{-1}$), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($1,36 \text{ mol L}^{-1}$) e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($0,81 \text{ mol L}^{-1}$) e adicionadas quantidades da solução estoque de modo que a proporção final fosse de 6,3:2,7:1 de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , o que representa a composição média das águas da região que explora o Aquífero Calcário Jandaíra (Silva Júnior; Gheyi; Medeiros, 1999). Os níveis de salinidade foram monitorados diariamente, com auxílio de condutivímetro portátil.

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento com vazão de $1,65 \text{ L h}^{-1}$ a 100 kPa de pressão de trabalho e coeficiente de uniformidade de distribuição de 95% com espaçamentos de 1,6 m entre linhas e emissores de 0,20 e 0,30 m para fornecer vazões por metro linear proporcional as lâminas requeridas. As lâminas de irrigação foram estimadas pelo percentual da evapotranspiração da cultura (ET_{c}) através do cálculo da evapotranspiração de referência diária (ET_0), pelo método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) e o coeficiente da cultura

(Kc) diário determinado pelo método do Kc dual. A ETo foi estimada a partir de dados coletados em uma estação meteorológica localizada próxima ao experimento. As lâminas totais de água aplicadas durante todo o ciclo foram de 299, 409, 520 mm para os déficits hídricos de D50, D25 e D0, sendo aplicado 77,2 mm igualmente para todos os tratamentos até o 12º dia utilizando a água de 1,5 dS m⁻¹ em todos os tratamentos (Figura 2).

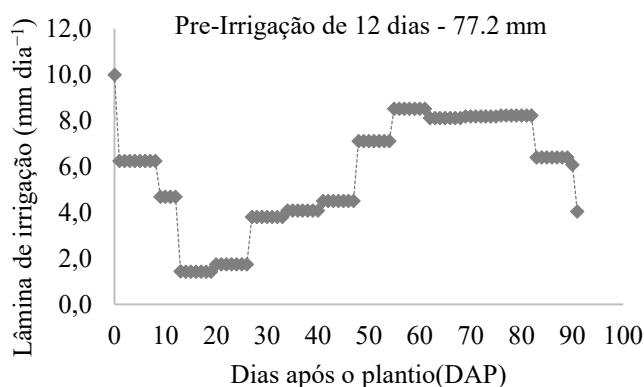


Figura 2. Lâmina de irrigação diária aplicada para o tratamento D0 sem déficit hídrico para cultivar de sorgo cv. BRS 506 para o ciclo de plantio de 2022 no município de Upanema, RN.

2.1. Salinidade e fertilidade do solo

Foram coletadas amostras de solo em dois pontos na parcela na profundidade de 0-40 cm no final do experimento para realização das seguintes análises químicas: as amostras foram levadas para o laboratório para medições do potencial de hidrogênio que foi preparado com 10 cm³ de solo para 25 ml de água e realizado a leitura no extrato aquoso solo-água 1:2,5, condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes), relação de adsorção de sódio (RAS) e porcentagem de sódio trocável (PST) no extrato aquoso solo-água 1:2,5 foi calculada conforme Silva et al (2009), ajustado para solo salino. Para isso, em parte das amostras também foram realizadas pasta de saturação e determinada a CE e as concentrações de Na⁺_{es} e (Ca²⁺_{es} + Mg²⁺_{es}), obtendo-se as relações (Eq. 1,2,3,4).

$$CE_{es} = 4,80 \times CE_{1:2,5} - 0,10 \quad (1)$$

$$Na^+_{es} = 4,71 \times Na^+_{1:2,5} + 0,46 \quad (2)$$

$$(Ca^{2+} + Mg^{2+})_{es} = 7,95 \times (Ca^{2+} + Mg^{2+})_{1:2,5} - 4,52 \quad (3)$$

$$RAS_{es} = \frac{Na^+_{es}}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+}_{es} + Mg^{2+}_{es})}{2}}} \quad (4)$$

Aos 56 dias após o plantio, foram coletadas duas plantas por parcelas para determinar os elementos Na, K, Ca e Mg na planta. As plantas foram separadas em raiz, caule (colmo + bainhas) e folha (limbos foliares), em seguida secas em estufa de circulação forçada à temperatura de 65 °C por 72 h, até atingir massa constante. Amostras previamente secas e moídas foram submetidas à digestão nítrica no digestor microondas (CEM–MARS 230/60) e os extratos foram utilizados na determinação da concentração de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , expressos em g kg^{-1} . A concentração de sódio e potássio foi determinado pela técnica de fotometria de chama (DM–64–4E). O Ca^{2+} e Mg^{2+} determinado por espectrofotometria de absorção atômica (Varian – AA240FS). Com esses dados foram quantificados a porcentagem de acúmulo de íons em cada compartimento da planta (raiz, caule e folha) obtido pelo produto entre a biomassa seca e a respectiva concentração do elemento no tecido, bem como o acúmulo total para cada parte da planta. Posteriormente, a distribuição percentual do elemento nas partes da planta foi calculada pela razão entre o acúmulo no órgão e o acúmulo total da planta, multiplicado por 100.

Os dados foram analisados quanto à distribuição normal usando o teste de Shapiro-Wilk ao nível de 5% significância. Em seguida os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Após verificar efeito significativo na análise de variância (ANOVA), foi utilizado teste Tukey para comparação de médias ($p \leq 0,05$) com auxílio do pacote ExpDes.pt (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2014). As análises estatísticas foram realizadas por meio do software R® version 4.4. (Team, 2024).

3. RESULTADOS

3.1. Efeito da salinidade e déficit hídrico nas características do solo

De acordo com a análise de variância (Tabela 2), a condutividade elétrica, relação de adsorção de sódio e porcentagem de sódio trocável do extrato de saturação do solo responderam significativo à salinidade da água ($p \leq 0,01$), enquanto para o pH não houve efeito significativo. Em relação ao déficit hídrico, houve efeito significativo ($p \leq 0,05$) para condutividade elétrica e porcentagem de sódio trocável do extrato de saturação do solo. Para o potencial de hidrogênio e relação de adsorção de sódio no extrato de saturação não houve efeito significativo. Para a interação dos fatores estudados (salinidade $\times$ déficit) não se observou efeito significativo para as variáveis analisadas.

Tabela 2. Resumo da análise de variância dos índices de salinidade do solo irrigado com água salina (S) e déficit de água (D).

FV	GL	pH	CE _{es}	RAS _{es}	PST
Quadrado médio					
Blocos	3	0,02 ^{ns}	1,34 ^{ns}	2,35 ^{ns}	66,33**
S	2	0,00 ^{ns}	38,68**	90,64**	1367,75**
D	2	0,06 ^{ns}	4,35*	3,23 ^{ns}	57,80**
S × D	4	0,03 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,72 ^{ns}	1,13 ^{ns}
Resíduo	24	0,02	1,05	1,45	8,41
CV (%)	-	1,89	26,13	28,25	15,18
Média (g kg ⁻¹)	-	7,98	3,93	4,26	19,11

FV- Fonte de variação, GL- grau de liberdade, CV- coeficiente de variação, S- salinidade da água de irrigação, D- déficit hídrico, B- bloco. e ** e ^{ns} indicam diferenças significativas de $0,01 \geq p \leq 0,05$ e não significativa ($p > 0,05$) respectivamente de acordo com o teste F.

Os parâmetros iniciais da salinidade do solo (Tabela 1) foram para a condutividade elétrica do solo foi de $0,85 \text{ dS m}^{-1}$, relação de adsorção de sódio $0,29 (\text{mmol L}^{-1})^{0,5}$ e a porcentagem de sódio trocável é de 5,05% esses são os dados do solo antes do início do experimento.

Para as condições dos tratamentos relativos às salinidades da água de irrigação, verifica-se na Figuras 3A, os resultados de condutividade elétrica no extrato de saturação, relação de adsorção de sódio e porcentagem de sódio trocável do extrato de saturação do solo. Os tratamentos com maior salinidade ($3,8$ e $6,0 \text{ dSm}^{-1}$) apresentaram valores estatisticamente superiores aos observados na condição de menor salinidade ($1,5 \text{ dSm}^{-1}$) com incrementos de 179,66 e 74,74%, evidenciando o acúmulo progressivo de sais e sódio trocável no solo com o aumento da CEa da água de irrigação. Os valores de CEes variaram de $1,90$ a $5,32 \text{ dS m}^{-1}$, com aumentos expressivos na RAS de $1,13$ para $6,28 (\text{mmol L}^{-1})^{0,5}$ e na PST de 6,88% para 26,59%, correspondendo a acréscimos de 179,66%, 456,28% e 286,44%, respectivamente em relação a menor para a maior salinidade.

O déficit hídrico aplicado também influenciou significativamente as características salinas do solo (Figura 3B). A condutividade elétrica do extrato de saturação apresentou variações expressivas, especialmente sob o déficit de 50%, que diferiu estatisticamente da condição sem déficit, mas se assemelhou ao tratamento com 25% de déficit hídrico. Os valores oscilaram entre $3,51$ e $4,62 \text{ dS m}^{-1}$, representando um aumento de 31,57% na salinidade do solo entre os extremos de 0 e 50% de déficit. A porcentagem de sódio trocável (PST) também foi impactada, sendo significativamente maior sob o déficit de 50%, onde diferiu estatisticamente das condições de 0 e 25% de déficit. A variação foi de $17,94$ a $21,64$ que representa um aumento de 20,60% para um déficit de 0 a 50% respectivamente.

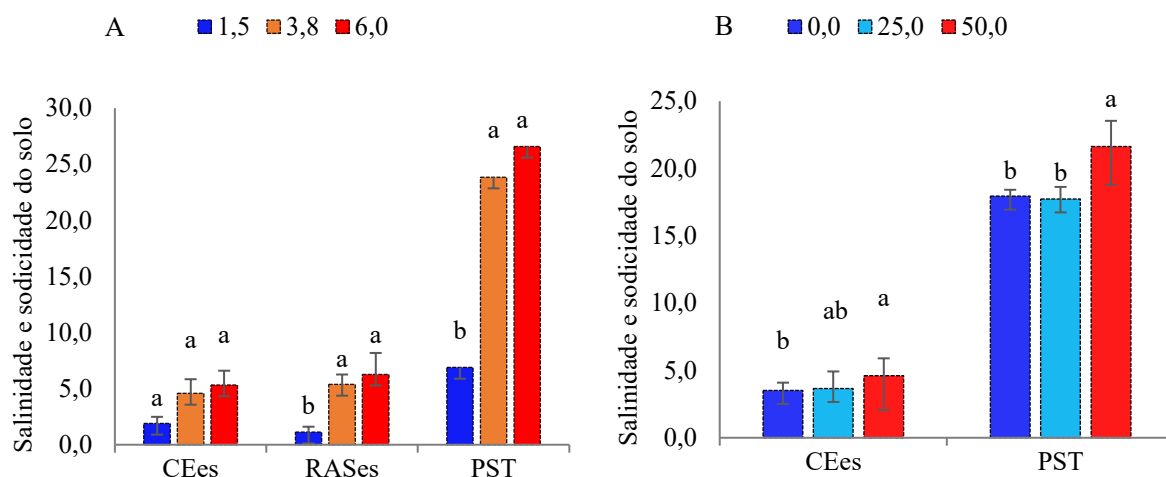


Figura 3. Condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes, dSm^{-1}), relação de adsorção de sódio do extrato de saturação (RASes, $(\text{mmol L}^{-1})^{0,5}$) e porcentagem de sódio trocável (PST, %) para condições de estresse salino (A) e condutividade elétrica do extrato de saturação do solo e porcentagem de sódio trocável (B) condições de déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada variável não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). As dispersões nas barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$).

3.2. Homeostase iônica

De acordo com a análise de variância (Tabela 3), os íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{K}^+:\text{Na}^+$, $\text{Ca}^{2+}:\text{Na}^+$, $\text{Mg}^{2+}:\text{Na}^+$ na raiz da planta apresentaram efeito significativo ($p \leq 0,01$) para salinidade da água de irrigação. Enquanto a salinidade da água de irrigação exerceu efeito nas variáveis de Na^+ , $\text{K}^+:\text{Na}^+$, $\text{Ca}^{2+}:\text{Na}^+$ e $^+$, $\text{Mg}^{2+}:\text{Na}^+$ do caule ($p \leq 0,01$). Enquanto para déficit hídrico, verifica-se efeito significativo nas concentrações de Na^+ e nas relações de $\text{K}^+:\text{Na}^+$, $\text{Ca}^{2+}:\text{Na}^+$ e $^+$, $\text{Mg}^{2+}:\text{Na}^+$ da raiz e de Na^+ , $\text{Ca}^+:\text{Na}^+$ do caule, e Mg^{2+} foliar apresentou efeito significativo. Para a interação salinidade $\times$ déficit, constata-se efeito significativo apenas na concentração de Mg^{2+} na raiz ($p \leq 0,01$) e para as concentrações de Na^+ , Ca^+ e relação $\text{Ca}^+:\text{Na}^+$ no caule.

Tabela 3. Resumo da análise de variância da compartimentação dos íons para cultivar de sorgo BRS 506 em condições de estresse salino e déficit hídrico.

FV	GL	Na	K	Ca	Mg	K:Na	Ca:Na	Mg:Na
		Raíz						
		Quadrado médio						
Bloco	3	0,97 ^{ns}	5,38 ^{ns}	0,78 ^{ns}	0,10 ^{ns}	1,33 ^{ns}	0,04*	0,02**
S	2	41,33**	21,90**	1,53**	0,27**	18,24**	0,08**	0,14**
D	2	10,46**	3,42 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,06 ^{ns}	3,94**	0,06**	0,04**
S x D	4	1,35 ^{ns}	2,46 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,11*	0,18 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Resíduo	24	1,15	2,62	0,27	0,04	0,68	0,01	0,00
CV (%)	-	19,79	14,38	29,33	11,06	32,57	28,93	17,19
Média	-	5,41	11,25	1,77	1,73	2,52	0,36	0,36
Caule								
Bloco	3	0,01 ^{ns}	40,50 ^{ns}	0,61*	1,51**	85,33 ^{ns}	8,38**	28,39 ^{ns}
S	2	0,28**	2,22 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,18 ^{ns}	8603,50**	29,95**	76,10**
D	2	0,13**	23,18 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,40 ^{ns}	1305,00 ^{ns}	10,72**	2,93 ^{ns}
S x D	4	0,09**	24,9 ^{ns}	0,55*	0,65 ^{ns}	1114,50 ^{ns}	7,18*	15,33 ^{ns}
Resíduo	24	0,02	21,88	0,16	0,31	429,58	1,77	11,02
CV (%)	-	38,06	18,86	22,38	21,95	25,34	23,17	39,61
Média	-	0,37	24,81	1,78	2,55	81,79	5,75	8,38
Folha								
Bloco	3	0,01 ^{ns}	15,04 ^{ns}	0,71 ^{ns}	0,68*	3677,00 ^{ns}	96,77 ^{ns}	356,23 ^{ns}
S	2	0,00 ^{ns}	3,54 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,54 ^{ns}	1085,00 ^{ns}	7,72 ^{ns}	72,80 ^{ns}
D	2	0,00 ^{ns}	3,01 ^{ns}	0,20 ^{ns}	0,87*	985,50 ^{ns}	57,74 ^{ns}	186,90 ^{ns}
S x D	4	0,00 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,38 ^{ns}	954,50 ^{ns}	31,62 ^{ns}	48,53 ^{ns}
Resíduo	24	0,01	3,55	0,27	0,21	4818,17	62,15	143,75
CV (%)	-	54,77	10,74	30,36	15,29	46,22	53,52	46,09
Média (gkg ⁻¹)	-	0,14	17,54	1,72	3,03	150,18	14,78	26,01

FV- fonte de variação, GL- grau de liberdade, CV- coeficiente de variação, S- salinidade da água de irrigação, D- déficit hídrico, * e ** e ^{ns} indicam diferenças significativas de $0,01 \geq p \leq 0,05$ e não significativa ($p > 0,05$) respectivamente de acordo com o teste F.

A irrigação com água salina promoveu um acúmulo significativo de Na⁺ nas raízes e no caule (Figura 4A), com destaque para a raiz com valores de 3,33, 6,03 e 6,88 g kg⁻¹ para CEa de 1,5, 3,8 e 6,0 dS m⁻¹ respectivamente, onde os teores dobraram sob irrigação com 6,0 dS m⁻¹ em comparação à menor salinidade 1,5 dS m⁻¹. Esse padrão indica uma restrição na translocação de Na⁺ para os tecidos aéreos, com concentrações relativamente baixas detectadas 0,24, 0,33 e 0,54 g kg⁻¹ no caule e folhas com média de 0,14 g kg⁻¹, mesmo sob elevada CEa, o que evidencia um mecanismo de retenção radicular ou exclusão seletiva.

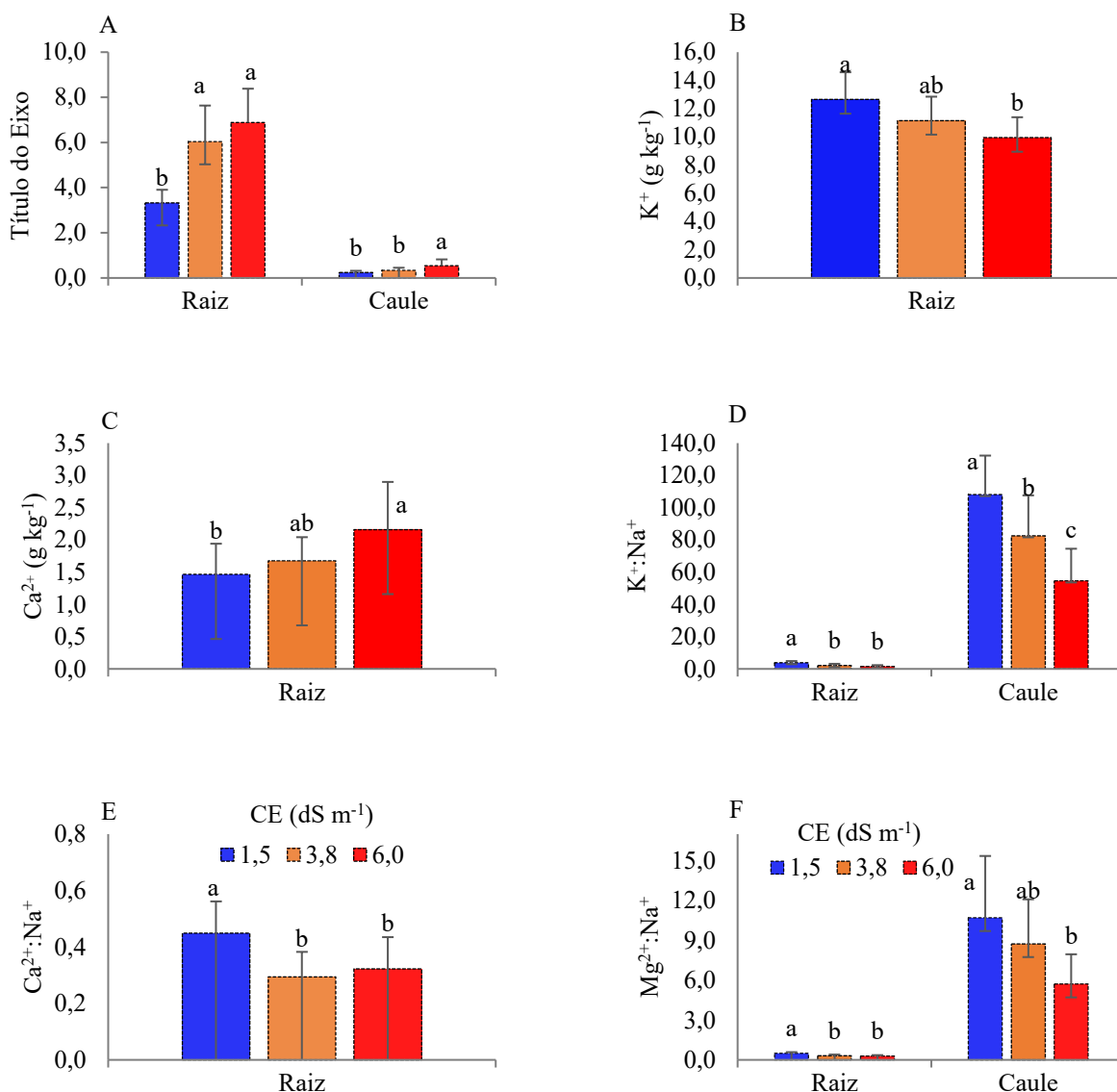


Figura 4. Concentração dos íons sódio (A), potássio (B), cálcio (C), relação potássio/sódio (D), cálcio/sódio (E) e magnésio/sódio (F) na raiz, caule e folha da cultivar de sorgo BRS 506 submetida as condições de estresse salino. Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada variável não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).

A concentração de K⁺ nas raízes (apresentou uma redução quando foi aplicado água de maior salinidade 6,0 dS m⁻¹ em relação ao tratamento com menor salinidade 1,5 dS m⁻¹ (Figura 4B). A capacidade de absorção do íon K⁺ pelas raízes reduziu em 21,34% para uma condição de CEa de 1,5 a 6,0 dS m⁻¹. Enquanto que para a parte aérea da planta a absorção de K⁺ manteve-se constante para as diferentes condições de salinidades com valores médios de 24,81 e 17,54 g kg⁻¹ no caule e folhas respectivamente, mantendo-se resiliente sem apresentar diferença entre os tratamentos submetidos.

A concentração de Ca^{2+} nas raízes das plantas de sorgo aumentaram como a salinidade da água (Figura 4C), apresentando diferenças significativas entre a maior salinidade ($6,0 \text{ dSm}^{-1}$) e a menor ($1,5 \text{ dSm}^{-1}$) que foi semelhante em relação a salinidade intermediária ($3,8 \text{ dSm}^{-1}$). Em condições de salinidade elevada absorção do íon Ca^{2+} se encontra maior em relação a condição de baixa salinidade que representa um aumento de 47,54% de absorção. Na parte aérea da planta caule ($1,78 \text{ g kg}^{-1}$) e folha ($1,72 \text{ g kg}^{-1}$) a absorção foi crescente com a variação de salinidade, mas não houve diferença significativa mantendo-se constante o Ca^{2+} na parte aérea da planta.

A relação $\text{K}^+:\text{Na}^+$ na planta é um indicativo de tolerância da planta a salinidade, o sistema radicular do sorgo apresentou diferença na relação, quando aumenta a salinidade reduzindo a relação em condições mais salinas (Figura 4D). No caule observa uma diminuição significativa da $\text{K}^+:\text{Na}^+$ à medida que a CEa aumenta, com o maior valor 108,16 ($1,5 \text{ dS m}^{-1}$) e menor 54,62 ($6,0 \text{ dS m}^{-1}$) que representa uma redução de 49,50% na relação. No entanto toda a parte aérea da planta composto por caule e folha (Tabela 3) que são tecidos mais sensíveis ao Na^+ apresentou uma alta relação de $\text{K}^+:\text{Na}^+$ que atua como um mecanismo para limitar os efeitos tóxicos do Na^+ no tecido celular da planta.

A razão $\text{Ca}^{2+}:\text{Na}^+$ no sistema radicular do sorgo apresentou variações significativas em função da salinidade da água de irrigação (Figura 4E). Observa-se que, na menor condutividade elétrica da água (CEa) de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$, a razão foi superior 0,45, diferindo estatisticamente das relações observadas sob maiores níveis de salinidade 3,8 e $6,0 \text{ dS m}^{-1}$, que apresentaram valores de 0,29 e 0,32, respectivamente, a baixa relação é devido a alta concentração de Na^+ nas raízes favorecendo a redução da relação nas concentrações maiores de salinidade. Na relação $\text{Mg}^{2+}:\text{Na}^+$ ocorreu diferença tanto para raízes como para o caule, e para a raiz a salinidade menor apresentou uma maior relação, para as duas maiores salinidades mantiveram semelhantes, para o caule as CEa 1,5 e $3,8 \text{ dSm}^{-1}$ apresentaram 10,70 e 8,74 valores estatisticamente iguais e diferentes para CEa de $6,0 \text{ dSm}^{-1}$ que foi de 5,70 apresentando redução na relação à medida que aumenta o estresse salino na planta.

3.3. Homeostase no déficit hídrico

O déficit hídrico aplicado nas plantas de sorgo apresentou resultados, em que os íons Na, Mg apresentaram maior absorção para as condições onde não ocorreu déficit hídrico, o Na na raiz (Figura 5A) foi maior na condição de sem déficit, e com déficit de 25% onde tiveram resultados estatisticamente igual com valores de 6,23 e $5,62 \text{ g kg}^{-1}$, enquanto que o déficit de 50% ocorreu uma redução de Na de 29,43% em relação a condição sem déficit hídrico. Para o Mg na folha, o íon apresentou maior absorção para as condições de 0 e 25% sendo semelhantes

entre si, enquanto que a condição de 50 e 25% é estatisticamente igual diferindo apenas da condição sem déficit hídrico (Figura 5B).

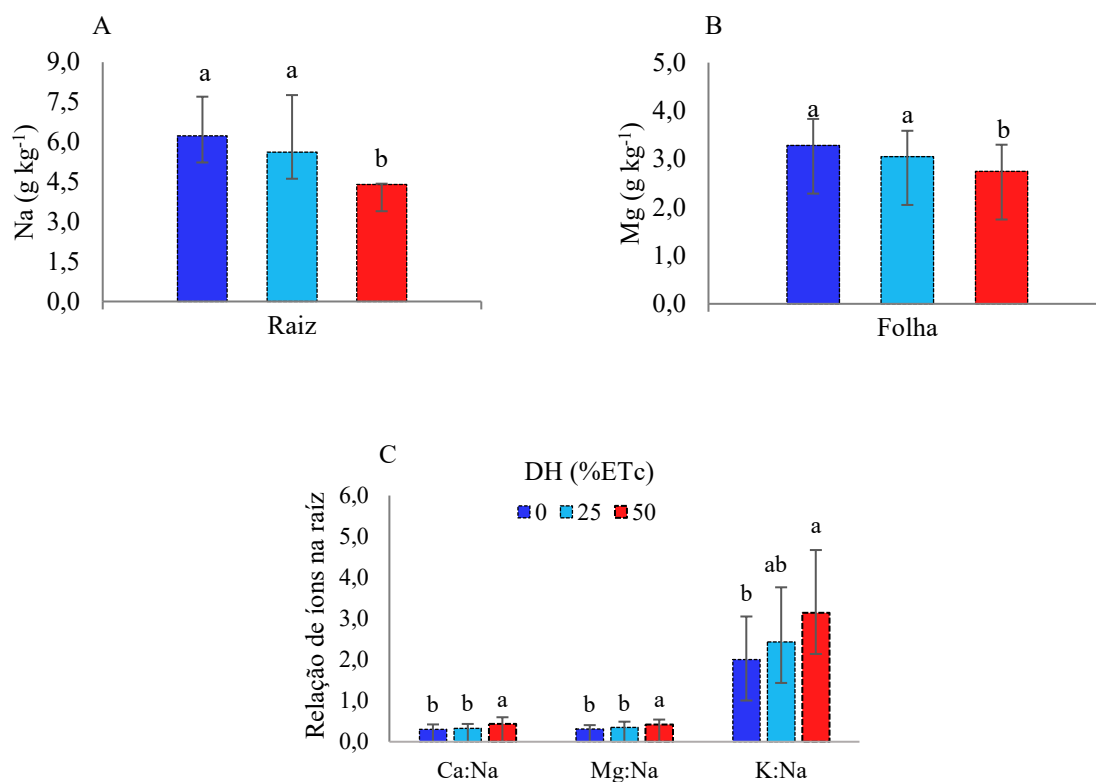


Figura 5. Concentração dos íons sódio nas raízes (A), magnésio na folha (B) e das relações cálcio/sódio, magnésio/sódio e potássio/sódio nas raízes (C) da cultivar de sorgo BRS 506 submetida as condições de déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada variável não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$).

As relações Ca:Na, Mg:Na e K:Na radicular aumentaram significativamente com aumento do déficit hídrico de 50% das necessidades hídricas da planta, estabilizando-se com diminuição do déficit hídrico, ou seja, semelhantes para os tratamentos de 0 e 25% de déficit hídrico (Figura 5C). O aumento significativo da relação registrado nas raízes para os tratamentos com e sem déficit hídrico em comparação com o tratamento de 50% de déficit hídrico, foi de 30,67, 25,46 e 36,17% para as relações Ca:Na, Mg:Na e K:Na radicular respectivamente.

A concentração do íon Mg nas raízes das plantas de sorgo em condições de salinidade e déficit hídrico apresentou maior absorção na situação sem déficit e na condição mais salina de 3,8 e 6,0 dSm⁻¹ (Figura 6A). Para as demais condições de déficit hídrico e variação da

salinidade, a absorção do íon Mg pela planta mantém-se semelhante sem diferença entre os tratamentos submetidos. Quando submetidas as plantas de sorgo as condições de estresse salino e déficit hídrico, apenas para condições de uma salinidade intermediária $3,8 \text{ dS m}^{-1}$, a maior absorção de Mg é constatada para condição sem déficit apresentando valores de $1,99 \text{ g kg}^{-1}$ de magnésio nas raízes, enquanto que à medida que intensifica o déficit, a absorção do íon foi reduzida para $1,65 \text{ g kg}^{-1}$. Para um déficit de 50%. Nas demais condições que foram submetidas as plantas manteve-se resiliente na absorção do magnésio pelo sistema radicular da planta.

No caule foi constatado a presença do íon Na em maior quantidade na condição sem déficit hídrico e na presença de maior salinidade ($6,0 \text{ dS m}^{-1}$) onde apresentou um valor de $0,83 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 6B). Enquanto que para as demais condições de salinidades, não houve diferenças para aplicação de déficit hídrico. Quando a planta está em condições de maior salinidade e submetidas a diferentes condições de déficit hídrico é observado que a maior absorção do íon Na se dá na irrigação com 100% da ETc já em condições de déficit de 25% e 50% da ETc, mesmo sob condições mais salinas, a absorção desse íon é reduzida mantendo baixa concentração no caule da planta.

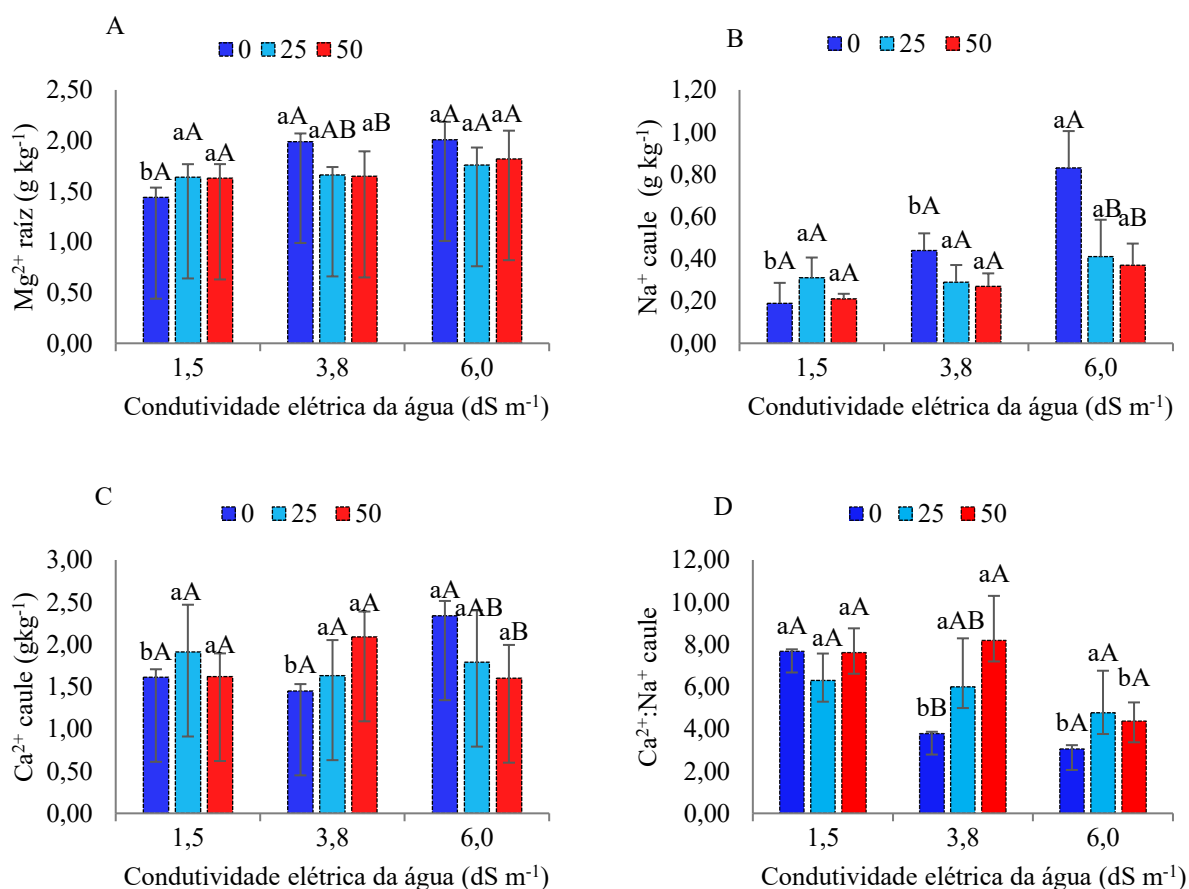


Figura 6. Concentrações de magnésio na raiz (A), sódio no caule (B), cálcio no caule (C), relação cálcio/sódio no caule (D) no sorgo cv. BRS 506 submetido as condições de estresse

salino e déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra minúscula (salinidade dentro do déficit hídrico) e letra maiúscula (déficit hídrico dentro de salinidade) não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).

O Ca no caule da planta para as condições de salinidade apresentou maior concentração na condição sem déficit hídrico para a salinidade de $6,0 \text{ dSm}^{-1}$, mantendo-se os resultados semelhantes para as demais de estresses (Figura 6C). Quando variou o déficit hídrico dentro de cada salinidade, o cálcio no caule manteve-se semelhante entre as salinidades de $1,5$ e $3,8 \text{ dSm}^{-1}$. Nas plantas irrigadas com água de $6,0 \text{ dS m}^{-1}$ os déficits 0 e 25% foram semelhantes entre si e diferente para a condição de 50% com incremento de 46,25% em relação a condição sem déficit.

A relação Ca:Na no caule da planta sob efeito de interação os resultados mostra que em condição de déficit hídrico de 50%, a variação da salinidade de $1,5$ e $3,8 \text{ dS m}^{-1}$ manteve estatisticamente iguais (Figura 6D) com valores de 7,61 e 8,19, sendo diferente para condição de maior salinidade $6,0 \text{ dS m}^{-1}$, enquanto para a condição sem déficit quando submetido a variação da salinidade foi observado maior valor da relação 7,67 para a salinidade de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$, enquanto que nas duas salinidades maiores a relações manteve-se iguais entre si diferindo apenas da salinidade menor. Quando mantém uma determinada salinidade e submete aos déficits hídricos foi possível verificar que na condição da salinidade intermediária de $3,8 \text{ dS m}^{-1}$, a relação foi menor para condição sem déficit hídrico, enquanto que para 25 e 50%, essas relações foi maior devido a maior absorção do íon Ca em relação ao Na^+ mantendo assim maior relação.

3.4.Biomassa e acúmulo de íons

De acordo com a análise de variância (Tabela 4), foram observado efeito significativo d estresse salino sob a massa seca das raízes e folhas, quanto ao acúmulo na compartimentação da planta (raiz, caule e folha) foi observado efeito significativo ($p \leq 0,01$) para o magnésio em toda compartimentação da planta, sódio e cálcio ($p \leq 0,05$) no caule e folha e potássio na folha. Na interação entre os fatores estudados (salinidade x déficit hídrico) observou-se efeito significativo ($p \leq 0,05$) apenas para o acúmulo de sódio nas raízes das plantas. Para as condições isoladas de déficit hídrico, não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos.

Tabela 4. Resumo da análise de variância do conteúdo íons acumulado na compartimentação da cultivar de sorgo BRS 506 em condições de estresse salino e déficit hídrico.

FV	GL	MS	Na	K	Ca	Mg
		Raíz				
		Quadrado médio				
Bloco	3	7,75 ^{ns}	143,10 ^{ns}	403,57 ^{ns}	74,01*	31,93 ^{ns}
S	2	252,36*	597,50*	180,90 ^{ns}	6,48 ^{ns}	712,99**
D	2	52,20 ^{ns}	150,20 ^{ns}	429,85 ^{ns}	40,30 ^{ns}	84,95 ^{ns}
S x D	4	6,18 ^{ns}	442,85*	110,73 ^{ns}	34,06 ^{ns}	21,59 ^{ns}
Resíduo	24	62,09	158,77	156,54	23,47	33,38
CV (%)	-	22,37	18,7	23,24	6,05	26,05
Média	-	35,23	67,38	53,84	80,14	22,18
		Caule				
Bloco	3	22701,33 ^{ns}	151,87 ^{ns}	355,33 ^{ns}	13,37 ^{ns}	149,50 ^{ns}
S	2	21380,50 ^{ns}	793,05*	235,55 ^{ns}	43,99*	1160,50**
D	2	8113,00 ^{ns}	81,60 ^{ns}	355,30 ^{ns}	9,48 ^{ns}	117,10 ^{ns}
S x D	4	18574,00 ^{ns}	461,55 ^{ns}	85,40 ^{ns}	7,97 ^{ns}	49,75 ^{ns}
Resíduo	24	12589,67	187,73	139,15	8,04	61,28
CV (%)	-	49,32	47,98	27,02	42,67	12
Média	-	227,52	28,56	43,66	6,65	65,22
		Folha				
Bloco	3	55,54 ^{ns}	6585,33 ^{ns}	1793,00 ^{ns}	47,02*	68,32*
S	2	286,20*	24,53*	6423,50*	84,18**	73,92*
D	2	43,49 ^{ns}	11,19 ^{ns}	3,68 ^{ns}	27,63 ^{ns}	6,48 ^{ns}
S x D	4	25,84 ^{ns}	1033,50 ^{ns}	1688,75 ^{ns}	16,85 ^{ns}	21,00 ^{ns}
Resíduo	24	75,55	4519,67	1526,33	13,57	16,21
CV (%)	-	12,23	52,29	49,46	27,88	31,94
Média (g kg ⁻¹)	-	71,05	4,07	2,5	13,21	12,61

FV- fonte de variação, GL- grau de liberdade, CV- coeficiente de variação, S- salinidade da água de irrigação, D- déficit hídrico, B- bloco. * e ** e ^{ns} indicam diferenças significativas de $0,01 \geq p \leq 0,05$ e não significativa ($p > 0,05$) respectivamente de acordo com o teste F.

Ao submeter as diferentes salinidades e aplicar os déficits hídrico foi verificado efeito significativo onde o acúmulo de sódio é reduzido na condição sem déficit 50,36%, para uma condição de salinidade de 6,0 dSm⁻¹ para os déficits de 25 e 50% os valores foram de 67,57 e 59,91% respectivamente (Figura 7). Para as demais situações submetidas com a variação de salinidade de 1,5 e 3,8 dSm⁻¹ o acúmulo mantém contante sem diferença entre os tratamentos. A interação salinidade e déficit hídrico para o acúmulo de sódio nas raízes da planta mantém-se constante sem efeito significativo quando avaliamos o déficit hídrico dentro de cada condição de salinidade.

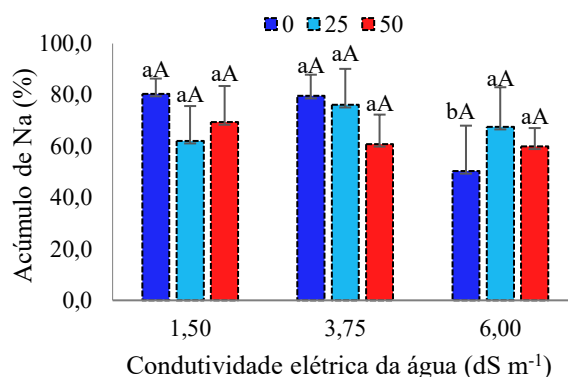


Figura 7. Acúmulo de sódio nas raízes em relação acúmulo total na planta para cultivar de sorgo BRS 506 submetida as condições de estresse salino e déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra minúscula (salinidade dentro do déficit hídrico) e letra maiúscula (déficit hídrico dentro de salinidade) não diferem estatisticamente no teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam um erro padrão da média ($n = 4$).

A irrigação com água salina reduziu significativamente a biomassa da raiz e folhas do sorgo em 22,04% e 12,12% em relação nas salinidades de 1,5 e 6,0 dS m⁻¹ respectivamente (Figura 8A). O conteúdo dos íons armazenado nas raízes da planta para a condição de salinidade, foi observado diferença significativa para o íon magnésio em que o acúmulo foi maior para as condições de salinidade 3,8 e 6,0 dSm⁻¹ apresentando acúmulo de 24,20 e 28,67% de magnésio enquanto que para salinidade de 1,5 dSm⁻¹ o acúmulo foi de 13,66%, para potássio e cálcio as condições de salinidade manteve semelhante o acúmulo desses elementos nas raízes do sorgo.

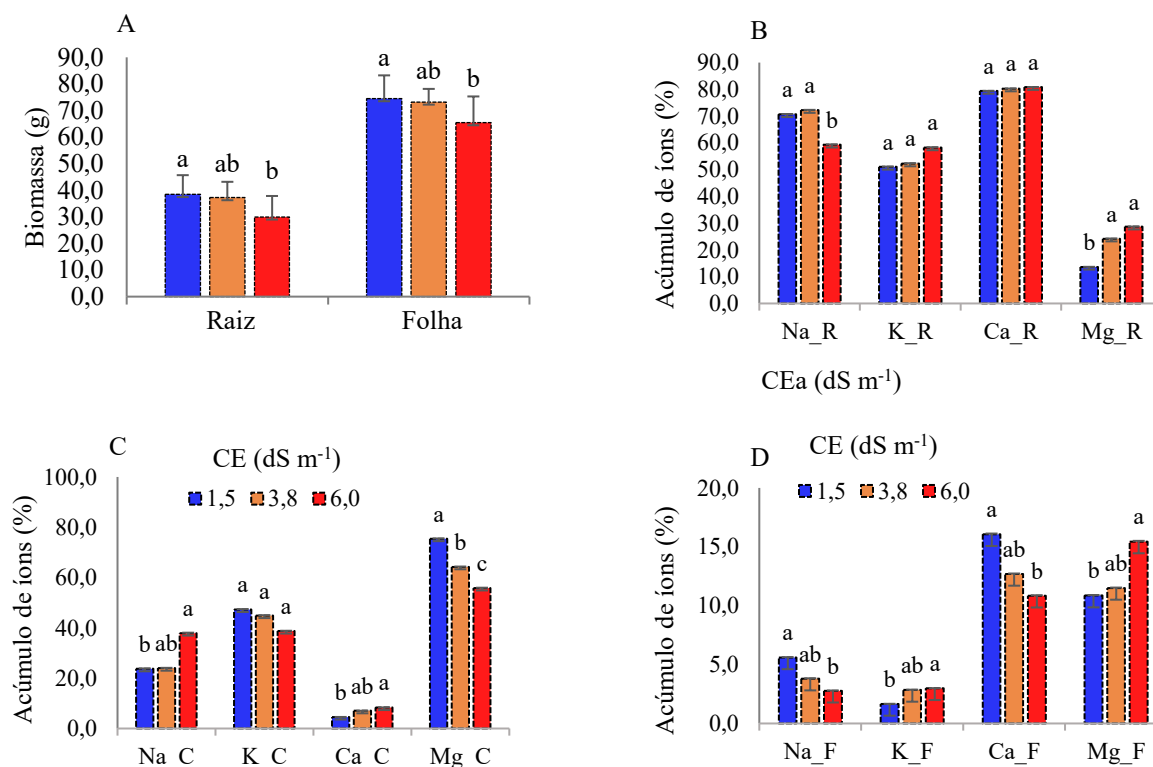


Figura 8. Biomassa (A) e acúmulo em relação ao total na planta dos íons sódio, cálcio, potássio e magnésio nas raízes (B), caule (C) e folha (D) para cultivar de sorgo BRS 506 submetida as condições de estresse salino. Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada variável não diferem estatisticamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$).

O acúmulo de íons no caule) foi significativo para o sódio, cálcio e magnésio, em que o sódio apresentou maior acúmulo juntamente como cálcio apresentando valores de 37,94% e 8,34% para as condições de salinidade de 6,0 dS m⁻¹, para as demais condições de salinidade menores os acúmulos dos íons mantearam-se constante entre os tratamentos (Figura 8C). Para o magnésio em condições de maior salinidade ocorreu uma redução do acúmulo do elemento e de acordo que a condição de salinidade foi reduzindo o acúmulo do magnésio foi aumentando na planta chegando 75,48% de acúmulo do elemento para condições de 1,5 dS m⁻¹.

O acúmulo de sódio nas folhas diminuiu significativamente com o aumento da salinidade da água de irrigação de 6,0 dS m⁻¹ e mantendo resultado semelhante para os tratamentos de salinidades de 1,5 e 3,8 dS m⁻¹ (Figura 8D). A redução registrada em comparação com o tratamento de menor salinidade foi de 50,45% em relação a condição mais salina. O potássio manteve comportamento semelhante ao sódio para as condições de maior salinidade aumentando sua absorção para essas condições. O cálcio e magnésio na folha da planta manteve maior acúmulo em relação ao sódio e potássio, onde o acúmulo de cálcio foi maior para as

condições de salinidades de 1,5 e 3,8 dS m⁻¹ e representando 16,07, 12,70% e na condição mais salina foi de 10,85% um valor de aproximadamente quatro vezes em relação ao sódio nessas condições. Enquanto o magnésio foi maior para condições mais salina apresentando 15,45, 11,51 e 10,86% de acúmulo na folha para condições de 6,0, 3,8 e 1,5 dSm⁻¹.

4. DISCUSSÃO

4.1. Efeito da salinidade e déficit hídrico nas características do solo

As características de salinidade do solo condutividade elétrica do extrato de saturação, relação de adsorção de sódio e porcentagem de sódio trocável do extrato de saturação são importantes indicadores de salinização do solo (Wang *et al.*, 2023). O solo inicialmente apresentava-se normal com salinidade de 0,85 dS m⁻¹, relação de adsorção de sódio de 0,29 (mmol L⁻¹)^{0.5} e porcentagem de sódio trocável de 5,05%. Os resultados mostram um avanço na possível salinização e sodificação do solo, com potenciais impactos negativos ao solo e nas culturas caso não seja realizado um manejo para contornar esses efeitos. A dispersão das argilas e consequentemente compactação do solo é intensificada com a irrigação de águas com altos teores de sódio que afeta crescimento radicular e absorção de nutrientes pelas culturas (Liu; Jiang; Yuan, 2024; Wang *et al.*, 2023). Níveis elevados de PST acima de 15% são considerados críticos para a maioria das culturas sensíveis, sendo os valores observados no presente estudo indicativos de um solo com risco de degradação química se práticas corretivas não forem adotadas. Nesse sentido é necessário o monitoramento constante da qualidade da água de irrigação e da salinidade do solo, bem como a aplicação de estratégias de manejo, como a gessagem, o uso de culturas tolerantes à salinidade e práticas de lixiviação controlada, (Gheyi *et al.*, 2022; Lei *et al.*, 2025). O período chuvoso apresentar irregularidade com chuvas concentradas em um período curto, mas com volume grande que são necessários para que os sais no solo sejam lixiviados para fora da zona radicular.

Além da salinidade da água de irrigação, o déficit hídrico de 50% aplicado impactou significativamente as características salinas do solo de condutividade elétrica e porcentagem de sódio trocável aumentando com o déficit hídrico submetido. A restrição hídrica reduz a lixiviação dos sais, que são acumulados na zona radicular (Ramos *et al.*, 2023). Nessas condições, o risco de salinização é aumentado devido a evaporação superar a percolação da água e concentrando os sais solúveis na superfície do solo. O aumento da PST sob estresse

hídrico agrava a sodificação do solo, favorecendo a dispersão de partículas e a degradação estrutural (Netto *et al.*, 2007). Esses efeitos ocasionam problemas na infiltração da água no solo. Os efeitos combinados da salinidade e da restrição hídrica geram um ambiente desfavorável para o crescimento radicular e a absorção de nutrientes, podendo reduzir significativamente o rendimento das culturas (Muhammad *et al.*, 2024), principalmente em solos argilosos ou mal drenados acumulando sais na zona radicular da cultura. Os resultados demonstram a necessidade de um manejo na irrigação com aplicação de uma fração de lâmina de lixiviação, buscando reduzir os efeitos da salinidade e garantir a sustentabilidade produtiva em ambientes semiáridos e irrigados com águas de baixa qualidade. A lavagem durante o período de chuvas é mais eficiente para lixiviação de sais do solo (Monteleone; Libutti, 2012).

4.2. Efeito do estresse hídrico salino na homeostase iônica das plantas

O estresse salino combinado com o déficit hídrico é importante ser estudado para verificar a resposta do sorgo a essas condições e seus mecanismos de resposta para contornar os efeitos ocasionados. O tratamento com maior salinidade apresentou um maior acúmulo do íon Na^+ no sistema radicular, mostrando a capacidade das raízes restringir a passagem deste elemento para a parte aérea da planta que são mais sensíveis ao Na^+ . Nesse sentido buscando minimizar a toxicidade iônica causada pelo íon Na^+ que afeta os tecidos fotossintéticos, o sistema radicular atua como mecanismo de defesa na retenção desses íons no sistema radicular das plantas tolerantes (Munns; Tester, 2008; Roy; Negrão; Tester, 2014). O controle do transporte via canais seletivos e bombas de efluxo nas membranas celulares, impedem o acúmulo excessivo de Na^+ no xilema atuando como mecanismos de controle da entrada do íon na membrana plasmática (Xie; Zhou; Jiang, 2022). A redução de absorção do Na^+ na parte aérea e acúmulo no sistema radicular observado nesse trabalho corrobora com (Silva; Ferreira; Alvarez-Pizarro, 2023) ao estudar cultivares de *Urochloa* spp. em condições salinas onde apresentou maior capacidade de retenção de Na^+ em suas raízes e reduzindo o acúmulo em seus tecidos aéreos. Esse mecanismo apresenta um importante via de mitigação dos efeitos adversos da salinidade sobre o metabolismo da planta. A manutenção de baixos níveis de Na^+ no caule, conforme observado neste estudo, reforça o papel da raiz como barreira de proteção contra o avanço do íon para a parte aérea. Sendo confirmado por (Guo *et al.*, 2023) ao estudar o sorgo sacarino, observaram que o acúmulo de Na^+ especialmente nas lâminas foliares foi muito menor do que nas raízes sob condições de estresse salino. O mecanismo de compartimentação presente nos tecidos foliares atua restringindo a presença excessiva de Na^+ que pode afetar a fotossíntese, integridade das membranas celulares e o balanço osmótico das plantas (Balasubramaniam *et*

al., 2023a). A capacidade da planta regular a homeostase iônica em condições de salinidade crescente é demonstrada com os resultados encontrados o que demonstra a tolerância a salinidade.

As raízes da planta apresentou diminuição da absorção de K^+ que pode estar associada a competição iônica com Na^+ nas condições salinas (Guo *et al.*, 2023). Essa competição, frequentemente observada em ambientes salinos, ocorre devido à similaridade no raio iônico e à entrada preferencial de Na^+ por canais de transporte de K^+ de baixa afinidade, como AKT1 e HAK/KUP (Wang *et al.*, 2024; Zelm; Zhang; Testerink, 2020). Esse processo reduz a eficiência de captação de K^+ pelas raízes, comprometendo seu acúmulo em tecidos subterrâneos. Os canais Shaker HKT1 e AKT1 que são transportadores de K^+ podem ser inibidos com os altos níveis de Na^+ na solução d solo (Wang *et al.*, 2024). Todavia, independente da salinidade, os níveis de K^+ na parte aérea da planta mantiveram-se constante, indicando que o transporte seletivo e a recirculação de K^+ para os tecidos aéreos seja realizado por mecanismos compensatórios desse íon (Lian *et al.*, 2023), porque o sorgo mantém mecanismo eficiente na restrição da translocação do sódio das raízes para a parte aérea da planta mantendo assim alta concentração de K^+ nesses órgãos. O mecanismo de homeostase na manutenção de processos fisiológicos críticos, como ativação de enzimas que envolve o aparato do metabolismo energético e fotossínteses, regulação estomática e equilíbrio iônico das células da planta em condições de salinidade é fundamental para um bom desenvolvimento das plantas (Amin *et al.*, 2021; Fu; Yang, 2023).

O aumento na absorção de Ca^{2+} no sistema radicular do sorgo sob condição de elevada salinidade (6,0 dS m^{-1}) observado neste estudo, está em acordo com achados recentes que apontam o cálcio como um elemento chave na resposta adaptativa das plantas ao estresse salino (Dong *et al.*, 2022; Tong *et al.*, 2021). Atuando como mensageiro secundário nos mecanismos de sinalizações envolvidos na tolerância ao sal envolvidos na abertura estomática, seletividade iônica e integridade da membrana plasmática (NAZ *et al.*, 2024). O aumento na absorção de Ca^{2+} pelo sistema radicular pode ser explicado como estratégia em manter a homeostase iônica, especialmente em condições de excesso de Na^+ , uma vez que o Ca^{2+} ajuda a manter a seletividade dos canais de membrana e estabilidades das estruturas celulares (Hasanuzzaman *et al.*, 2020), atuando com sinalizador do estresse e reduzindo a entrada de Na^+ na membrana celular. Segundo (Zhu, 2016), o aumento de Ca^{2+} sob estresse salino também pode favorecer a ativação de proteínas transportadoras e vias de compartimentação. Apesar do aumento da absorção radicular, os níveis de Ca^{2+} na parte aérea do sorgo não apresentaram variação significativa entre os tratamentos. Este resultado sugere uma regulação no transporte de Ca^{2+} do sistema radicular para os tecidos aéreos, possivelmente para evitar o acúmulo excessivo de

cátions em tecidos fotossintéticos, preservando o funcionamento do metabolismo celular. Nesse sentido o comportamento observado reforça o papel adaptativo do cálcio em sistemas vegetais sob condições de salinidade.

Frequentemente usado como marcador de tolerância a salinidade a relação $K^+:Na^+$ é um importante indicativo fisiológico na planta em lidar com o estresse salino (Munns; Tester, 2008; Roy; Negrão; Tester, 2014). Na condição sob estresse salino, há um aumento na absorção e acúmulo de Na^+ nas células, o que pode comprometer processos celulares essenciais, como a atividade enzimática, equilíbrio osmótico e integridade das membranas (Zhu, 2016). Manter uma alta relação $K^+:Na^+$, especialmente nos tecidos mais sensíveis como folhas e caules, é crucial para garantir a homeostase iônica e evitar os efeitos tóxicos do Na^+ . Nas plantas para os tratamentos submetidos não foi observado danos causados pelo a salinidade da água de irrigação nos tecidos das plantas, o que confirma a tolerância moderada da cultura a salinidade.

No estudo, foi observada uma redução significativa da relação $K^+:Na^+$ na parte aérea da planta com aumento da salinidade da água de irrigação, com queda de 49,50% entre os tratamentos de 1,5 e 6,0 dS m^{-1} . Apesar do sistema radicular indicar a tendência de regular a entrada de íons, o acúmulo de Na^+ na parte aérea aumenta sob salinidade elevada. No entanto, os valores absolutos da relação $K^+:Na^+$ permaneceram elevados, com valores acima de 50 mesmo sob maior salinidade, o que sugere a existência de mecanismos eficientes de exclusão de Na^+ e ou recirculação de K^+ da raiz para a parte aérea, característicos de espécies mais tolerantes (Kumari *et al.*, 2021).

Manter uma relação $Ca^{2+}:Na^+$ elevada é vital para a homeostase dos íons, prevenindo a toxicidade do Na^+ . O aumento do estresse salino compromete a manutenção da razão $Ca^{2+}:Na^+$ nas raízes, refletindo através dos resultados a competição iônica entre esses cátions. A substituição competitiva do Ca^{2+} pelo Na^+ pelos sítios de ligação na membrana plasmática pode prejudicar a integridade e a funcionalidade celular, resultando em menor estabilidade da parede celular e na redução da eficiência do transporte seletivo de íons (Assaha *et al.*, 2017; Zörb; Geilfus; Dietz, 2018). Por outro lado, a razão $Ca^{2+}:Na^+$ nas folhas apresentou pouca variação entre os tratamentos, o que sugere a atuação de mecanismos eficientes de compartimentalização e transporte seletivo na parte aérea, capazes de promover a exclusão do Na^+ ou direcionar preferencialmente o Ca^{2+} para esses tecidos (Munns; James; Läuchli, 2006).

Nas raízes, a maior relação de $Mg^{2+}:Na^+$ foi verificada na menor CEa, enquanto as maiores salinidades resultaram em redução da razão, com valores similares entre si. Esse comportamento está associado à interferência do Na^+ na absorção e no transporte de Mg^{2+} , possivelmente por competição nos sítios de transporte de cátions bivalentes nas membranas

plasmáticas (Parisa *et al.*, 2025). No caule, a razão $Mg^{2+}:Na^+$ também decresceu com o aumento da salinidade. A queda gradual na razão $Mg^{2+}:Na^+$ pode afetar diretamente processos vitais da planta, como a fotossíntese e a produção de proteínas (Parisa *et al.*, 2025). Isso acontece porque o Mg^{2+} , além de participar como cofator de diversas enzimas, é peça-chave da molécula de clorofila responsável por captar a luz e sustentar a produção de energia (Negrão; Schmöckel; Tester, 2017; Parihar *et al.*, 2015).

As mudanças observadas nas relações iônicas evidenciam como o estresse salino interfere na absorção e no transporte de cátions essenciais. Esses resultados reforçam que a capacidade de manter homeostase iônica é um critério fisiológico importante para a tolerância à salinidade no sorgo. Aparentemente, o sucesso dessa espécie em ambientes salinos está ligado à habilidade de limitar o acúmulo de Na^+ nos tecidos mais sensíveis e, ao mesmo tempo, preservar a seletividade por cátions como Ca^{2+} e Mg^{2+} , fundamentais para a manutenção das funções celulares (Assaha *et al.*, 2017; Munns; James; Läuchli, 2006).

4.3. Homeostase no déficit hídrico

Os resultados obtidos no presente estudo demonstram que o déficit hídrico promoveu redução significativa na absorção de Na^+ pelas raízes. Em condições de déficit hídrico, observou-se redução na concentração de íons Na^+ nas raízes, o que pode estar associado a mecanismos fisiológicos como ativação do sistema SOS, compartimentação no vacúolo do íon, ajuste osmótico para a defesa da planta. A limitação hídrica tende a reduzir o crescimento e a ramificação do sistema radicular, diminuindo a área efetiva de absorção de água e nutrientes (Tovignan *et al.*, 2023). Além disso, sob estresse hídrico, as plantas podem regular seletivamente a absorção de íons potencialmente tóxicos, como o sódio, a fim de evitar desequilíbrios iônicos e danos metabólicos (Hasanuzzaman *et al.*, 2020). A menor disponibilidade de água no solo limita a absorção de Na^+ . Em contrapartida, em condições de maior disponibilidade hídrica, observa-se maior absorção desse íon, uma vez que o crescimento radicular é favorecido e o transporte de solutos no solo ocorre de forma mais eficiente.

A redução do Mg^{2+} foliar sob déficit hídrico severo pode estar associada à diminuição do fluxo transpiratório, uma vez que o transporte desse cátion até a parte aérea ocorre predominantemente via xilema por fluxo de massa. A menor condutância estomática reduz o fluxo de seiva, limitando o suprimento de Mg^{2+} às folhas.

A resposta do Mg^{2+} na folha para condição de déficit hídrico severo apresentou redução em relação ao demais déficit. A resposta pode estar associada à diminuição do fluxo transpiratório porque esse cátion até a parte aérea ocorre via xilema por fluxo de massa e a

menor condutância estomática reduz o fluxo de seiva e limitando o suprimento de Mg^{2+} . (Ishfaq *et al.*, 2022). As relações $Ca^{2+}:Na^+$, $Mg^{2+}:Na^+$ e $K^+:Na^+$ radicular mantiveram-se altas para condições de déficit hídrico severo (50% da ETC), mostrando um equilíbrio em manter maior absorção dos nutrientes em relação ao íon tóxico Na^+ . Essa maior relação é devida ao Na^+ no déficit severo (Figura 5A) o sistema radicular do sorgo juntamente com seus mecanismos fisiológicos reduzir a absorção dos íons, indicando tolerância a planta.

4.4. Interação salinidade versus déficit hídrico

Os efeitos combinados entre déficit hídrico e salinidade para o íon Mg^{2+} nas raízes foi verificado que pode haver um ponto de estresse combinado crítico $3,8 \text{ dS m}^{-1}$ que nessa condição específica sob déficit hídrico há uma redução na absorção do íon. Que está relacionado à ativação diferencial de mecanismos de tolerância iônica e hídrica (Zheng *et al.*, 2024). O que sugere que o sorgo possui homeostase eficiente de Mg^{2+} sob estresse combinado. Para as condições sem déficit hídrico e alta salinidade as plantas pode estar usando Mg^{2+} para sintetizar clorofila e compensar o estresse oxidativo. O Mg^{2+} atua como cofator de enzimas do metabolismo energético, que podem ser induzidas sob salinidade e atuando como mecanismo de diluição iônica (Pilchova *et al.*, 2017), portanto a planta absorve mais Mg^{2+} para manter o balanço iônico contra o excesso de Na^+ (Zhao. *et al.*, 2021). Devido o déficit hídrico limitar o transporte de íons via fluxo de massa, mas a planta mantém absorção ativa de Mg^{2+} , sendo essencial para a fotossíntese e abertura e fechamento dos estômatos priorizado mesmo sob estresse. Pode haver um ponto de estresse combinado crítico nessa condição específica, onde os mecanismos de resiliência são evidenciados.

A redução do acúmulo de Na^+ no caule do sorgo submetido a águas de maior salinidade associada a lâminas reduzidas D25 e D50% ocorre devido a mecanismos fisiológicos da cultura, compartimentação iônica (Munns; Tester, 2008; Zhu *et al.*, 2025). Com a redução do volume de água aplicado ao solo, tende a reduzir o fluxo transpiratório da planta, e, conseqüentemente, o transporte do elemento via xilema para tecidos da parte aérea das plantas, tendendo a se acumular mais na raiz e em vez de sua translocação para o caule (Khan, 2025; Taiz *et al.*, 2017) como foi constatado na pesquisa.

Além disso, como estratégia de proteção metabólica, o sorgo apresenta elevada capacidade de retenção de Na^+ nas raízes e elevada compartimentação vacuolar em tecidos menos sensíveis, desta forma, evitando acúmulo de íons tóxicos em tecidos mais sensíveis das plantas (Balasubramaniam *et al.*, 2023a; Zhang *et al.*, 2025). Desta forma, a interação entre

controle seletivo de íons, a menor absorção de água devido as condições de estresse e mecanismos fisiológicos contribuem para a referida estabilidade nos teores de Na^+ .

Em relação à aplicação da maior salinidade de água esteve associada a condição sem déficit, houve o maior acúmulo de Na^+ no caule do sorgo, devido ao maior aporte de água que permitir maior fluxo transpiratório e absorção hídrica, intensificando o transporte xilemático. Com o suprimento pleno de água, a maior taxa de absorção hídrica favorece a abertura estomática e a taxa de transpiração, permitindo a movimentação passiva do sódio para partes aérea da planta, superando os mecanismos de exclusão e retenção iônica (Zhang *et al.*, 2025).

Ademais, o aumento do volume de água salina aplicado no solo ocasiona maior adição dos sais no sistema solo-planta ao longo do ciclo produtivo, elevando a carga iônica absorvida pelas plantas (Khan, 2025). Em espécies que apresenta tolerância moderada a salinidade, como é o caso do sorgo, o caule funciona como compartimento para armazenamento de elementos tóxicos, evitando que cheguem nos tecidos foliares (Zhu *et al.*, 2025). Essas informações também se relacionam aos resultados obtidos no presente trabalho, onde a concentração de Na^+ foi altamente superior nas raízes e no caule, em relação a sua concentração nos tecidos foliares.

O maior acúmulo de Ca^{2+} no caule do sorgo observado para o tratamento que associa maior salinidade de água e maior lâmina de irrigação está diretamente relacionado a maior adição do elemento no sistema, o qual permite maior concentração de Ca^{2+} na solução do solo. Isso também acontece, pois, a rota de transporte preferencial desse elemento na planta é a via fluxo transpiratório (WHITE; BROADLEY, 2003). O Ca^{2+} também atua na redução dos efeitos tóxicos do Na^+ competindo pelo cito de ligação, uma vez que desempenha papel fundamental na manutenção da integridade das membranas celulares e na estabilidade da parede celular (Seifikalhor *et al.*, 2019).

O maior suprimento do Ca^{2+} favorece a sua absorção pelas raízes e o seu transporte xilemático até os tecidos aéreos, sendo o caule um dos órgãos que mais acumulam esse elemento, principalmente devido à baixa mobilidade do Ca^{2+} no floema e sua deposição nos tecidos condutores e de sustentação (Manishankar *et al.*, 2018). Além disso, quando submetido ao estresse salino, ocorre um aumento da transpiração e da demanda fisiológica da planta por Ca^{2+} , intensificando o seu acúmulo no caule, que funciona como reservatório funcional do nutriente (Dugasa *et al.*, 2021; Lindberg; Premkumar, 2023).

Uma vez que o cálcio compete com os mesmos sítios de ligação com o Na^+ na parede celular e na membrana plasmática, logo, o aumento do acúmulo de cálcio é essencial na redução dos efeitos tóxicos do sódio e na preservação da homeostase iônica, pela manutenção ou aumento da relação $\text{Ca}^{2+}:\text{Na}^+$ (Manishankar *et al.*, 2018). A manutenção ou aumento da relação

$\text{Ca}^{2+}:\text{Na}^{+}$ no caule do sorgo, quando submetido ao estresse salino é um forte indicativo da tolerância da cultura, sendo esse mecanismo observado no presente trabalho.

4.5. Biomassa e conteúdo mineral na planta

A interação entre salinidade e déficit hídrico não exerceu efeito significativo sobre o conteúdo de Na^{+} nas raízes quando o déficit hídrico foi analisado isoladamente dentro de cada nível de salinidade, indicando que a restrição hídrica, nessas condições, não alterou a absorção ou retenção radicular de sódio. Esse resultado sugere que os mecanismos de homeostase iônica nas raízes mantiveram-se funcionalmente estáveis frente ao estresse hídrico imposto. Contudo, sob salinidade de $6,0 \text{ dS m}^{-1}$, observou-se menor acúmulo de sódio na ausência de déficit hídrico, indicando que a maior disponibilidade de água favorece mecanismos de controle do íon nas raízes. Esse efeito pode estar associado à maior eficiência do transporte iônico e à manutenção da integridade das membranas celulares, processos nos quais o cálcio atua como regulador central da estabilidade de membranas e da seletividade iônica (Munns; Tester, 2008; Seifikalhor *et al.*, 2019). Nos níveis de salinidade de $1,5$ e $3,8 \text{ dS m}^{-1}$, o conteúdo de sódio não foi influenciado pelo déficit hídrico, indicando que essas condições não foram suficientes para alterar a dinâmica de transporte do íon. Dessa forma, o acúmulo de Na^{+} nas raízes mostrou-se principalmente dependente da intensidade da salinidade, com efeito secundário do déficit hídrico.

A irrigação com água salina reduziu significativamente a biomassa radicular e foliar do sorgo. A redução da biomassa observada está associada principalmente ao desequilíbrio nutricional, ocasionado pelo estresse salino que limitam a absorção de água, a expansão celular e a eficiência fotossintética. Estudos recentes relatam que o aumento da salinidade compromete o acúmulo de biomassa de gramíneas, inclusive do sorgo, ao reduzir o potencial hídrico do solo e aumentar o custo energético para manutenção da homeostase celular, resultando em menor acúmulo de matéria seca (Acosta-Motos *et al.*, 2017; Hussain *et al.*, 2021).

O sorgo compartimentou os íons em grande quantidade principalmente nas raízes onde representou 59,28, 58,27, 80,81 e 28,67% para sódio, potássio, cálcio e magnésio respectivamente para a condição de salinidade de 6 dS m^{-1} . As raízes funcionam como uma barreira fisiológica, limitando a entrada excessiva de íon sódio no sistema vascular (Balasubramaniam *et al.*, 2023b; Calone *et al.*, 2020). A planta utiliza como mecanismo de atenuação do estresse salino, a restrição da translocação de íons tóxicos, especialmente o sódio, para o caule e as folhas, órgãos mais sensíveis ao acúmulo desse íon (Munns; Tester, 2008). Sob condição de estresse salino, observou-se que o sódio foi acumulado no caule em 37,94% e

apenas 2,78% nas folhas, evidenciando a eficiência dos mecanismos de controle do transporte e da compartimentação iônica pelo sorgo. Esses resultados confirmam a capacidade da planta em limitar a presença excessiva de sódio nos tecidos mais sensíveis, contribuindo para a manutenção da homeostase iônica e maior tolerância ao estresse salino.

5. CONCLUSÕES

O aumento da salinidade da água de irrigação elevou a CEes, RASes e a PST, indicando acúmulo progressivo de sal e potencial de sodificação, principalmente com a utilização de lâminas de irrigação deficitárias. O sorgo demonstrou eficiente retenção Na^+ nas raízes quando submetido ao estresse salino de 3,8 e 6,0 dS m^{-1} .

O mecanismo de compartimentação mostrou-se eficiente na homeostase iônica do sorgo cv. BRS 506, reduzindo as relações $\text{K}^+:\text{Na}^+$, $\text{Ca}^{2+}:\text{Na}^+$ e $\text{Mg}^{2+}:\text{Na}^+$ nas raízes, e aumentando-as na parte aérea. Isso destaca o potencial do sorgo como cultura tolerante à salinidade, reforçando a necessidade de práticas de irrigação adequadas e a seleção de cultivares que aprimorem esses mecanismos, visando à sustentabilidade agrícola sob condições de salinidade. O presente trabalho reforça a importância de estudos de campo para a compreensão do real papel dos mecanismos fisiológicos e bioquímicos que contribuem para a tolerância do sorgo à salinidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUSLIMA, E.; KANBAR, A.; RAORANE, M. L.; EICHE, E.; JUNKER, B. H.; HAUSE, B.; RIEMANN, M.; NICK, P. Gain time to adapt: How sorghum acquires tolerance to salinity. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1008172, 2022.
- ACOSTA-MOTOS, J. R.; ORTUÑO, M. F.; BERNAL-VICENTE, A.; DIAZ-VIVANCOS, P.; SANCHEZ-BLANCO, M. J.; HERNANDEZ, J. A. Plant Responses to Salt Stress: Adaptive Mechanisms. **Agronomy**, v. 7, n. 1, p. 18, 2017.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. **Roma: FAO**, v. 298, n. 0, 2006.
- AMIN, I.; RASOOL, S.; MIR, M. A.; WANI, W.; MASOODI, K. Z.; AHMAD, P. Ion homeostasis for salinity tolerance in plants: a molecular approach. **Physiologia Plantarum**, v. 171, n. 4, p. 578–594, 2021.

ASSAHA, D. V. M.; UEDA, A.; SANEOKA, H.; AL-YAHYAI, R.; YAISH, M. W. The Role of Na⁺ and K⁺ Transporters in Salt Stress Adaptation in Glycophytes. **Frontiers in Physiology**, v. 8, p. 509, 2017.

AYADI, M.; BRINI, F.; MASMOUDI, K. Overexpression of a Wheat Aquaporin Gene, TdPIP2;1, Enhances Salt and Drought Tolerance in Transgenic Durum Wheat cv. Maali. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 20, n. 10, p. 2389, 2019.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade de água na agricultura. *In*: ESTUDOS FAO, IRRIGAÇÃO E DRENAGEM 29, REVISADO 1. 2. ed. Campina Grande: UFPB: [s. n.], 1999. (Estudos FAO, irrigação e Drenagem 29, revisado 1). p. 153.

BALASUBRAMANIAM, T.; SHEN, G.; ESMAEILI, N.; ZHANG, H. Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress. **Plants**, v. 12, n. 12, p. 2253, 2023a.

BALASUBRAMANIAM, T.; SHEN, G.; ESMAEILI, N.; ZHANG, H. Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress. **Plants**, v. 12, n. 12, p. 2253, 2023b.

CALONE, R.; SANOUBAR, R.; LAMBERTINI, C.; SPERANZA, M.; VITTORI ANTISARI, L.; VIANELLO, G.; BARBANTI, L. Salt Tolerance and Na Allocation in Sorghum bicolor under Variable Soil and Water Salinity. **Plants**, v. 9, n. 5, p. 561, 2020.

DONG, Q.; WALLRAD, L.; ALMUTAIRI, B. O.; KUDLA, J. Ca²⁺ signaling in plant responses to abiotic stresses. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 64, n. 2, p. 287–300, 2022.

DUGASA, M. T.; FENG, X.; WANG, N.-H.; WANG, J.; WU, F. Comparative transcriptome and tolerance mechanism analysis in the two contrasting wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in response to drought and salinity stresses. **Plant Growth Regulation**, v. 94, n. 1, p. 101–114, 2021.

EMBRAPA. **BRS 506 o sorgo sacarino mais testado e plantado no Brasil**: Embrapa Milho e Sorgo, 2012.

EMPARN. **Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-Relatório Pluviométrico**. 2022. Disponível em: <https://meteorologia.emparn.rn.gov.br/relatorios/relatorios-pluviometricos>. Acesso em: 1 abr. 2025.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. 2014. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=51204>. Acesso em: 7 abr. 2025.

FU, H.; YANG, Y. How Plants Tolerate Salt Stress. **Current Issues in Molecular Biology**, v. 45, n. 7, p. 5914–5934, 2023.

GAUTAM, A.; PANDEY, A. K. Aquaporins Responses under Challenging Environmental Conditions and Abiotic Stress Tolerance in Plants. **The Botanical Review**, v. 87, n. 4, p. 467–495, 2021.

GHEYI, H. R.; LACERDA, C. F.; FREIRE, M. B. G. S.; COSTA, R. N. T.; SOUZA, E. R. de; SILVA, A. O. da; FRACETTO, G. G. M.; CAVALCANTE, L. F. Management and reclamation

of salt-affected soils: general assessment and experiences in the Brazilian semiarid region. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. e20217917, 2022.

GUO, H.; NIE, C.-Y.; LI, Z.; KANG, J.; WANG, X.-L.; CUI, Y.-N. Physiological and Transcriptional Analyses Provide Insight into Maintaining Ion Homeostasis of Sweet Sorghum under Salt Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 13, p. 11045, 2023.

HASANUZZAMAN, M.; BHUYAN, M. H. M. B.; ZULFIQAR, F.; RAZA, A.; MOHSIN, S. M.; MAHMUD, J. A.; FUJITA, M.; FOTOPOULOS, V. Reactive Oxygen Species and Antioxidant Defense in Plants under Abiotic Stress: Revisiting the Crucial Role of a Universal Defense Regulator. **Antioxidants**, v. 9, n. 8, p. 681, 2020.

HASSANI, A.; AZAPAGIC, A.; SHOKRI, N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 52, p. 33017–33027, 2020.

HUSSAIN, Sadam; HUSSAIN, Saddam; ALI, B.; REN, X.; CHEN, X.; LI, Q.; SAQIB, M.; AHMAD, N. Progresso recente na compreensão da tolerância à salinidade em plantas: História do equilíbrio $\text{Na}^+ / \text{K}^+ + \text{e}^-$ além. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 160, p. 239–256, 2021.

ISHFAQ, M.; WANG, Y.; YAN, M.; WANG, Z.; WU, L.; LI, C.; LI, X. Physiological Essence of Magnesium in Plants and Its Widespread Deficiency in the Farming System of China. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 802274, 2022.

KAPLAN, M.; KARA, K.; UNLUKARA, A.; KALE, H.; BUYUKKILIC BEYZI, S.; VAROL, I. S.; KIZILSIMSEK, M.; KAMALAK, A. Water deficit and nitrogen affects yield and feed value of sorghum sudangrass silage. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 30–36, 2019.

KARUMANCHI, A. R.; SIVAN, P.; KUMMARI, D.; RAJASHEKER, G.; KUMAR, S. A.; REDDY, P. S.; SURAVAJHALA, P.; PODHA, S.; KISHOR, P. B. K. Root and Leaf Anatomy, Ion Accumulation, and Transcriptome Pattern under Salt Stress Conditions in Contrasting Genotypes of Sorghum bicolor. **Plants**, v. 12, n. 13, p. 2400, 2023.

KHAN, M. K. Nutrient uptake under combined drought and salinity stress in hexaploid wheat species. **Frontiers in Plant Science**, v. 16, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1682258/full>. Acesso em: 6 fev. 2026.

KUMARI, S.; CHHILLAR, H.; CHOPRA, P.; KHANNA, R. R.; KHAN, M. I. R. Potassium: A track to develop salinity tolerant plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 167, p. 1011–1023, 2021.

LEI, S.; JIA, X.; ZHAO, C.; SHAO, M. A review of saline-alkali soil improvements in China: Efforts and their impacts on soil properties. **Agricultural Water Management**, v. 317, p. 109617, 2025.

LIAN, W.; GENG, A.; WANG, Y.; LIU, M.; ZHANG, Y.; WANG, X.; CHEN, G. The Molecular Mechanism of Potassium Absorption, Transport, and Utilization in Rice. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 23, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/23/16682>. Acesso em: 24 fev. 2026.

LINDBERG, S.; PREMKUMAR, A. Ion Changes and Signaling under Salt Stress in Wheat and Other Important Crops. **Plants**, v. 13, n. 1, p. 46, 2023.

LIU, C.; JIANG, X.; YUAN, Z. Plant Responses and Adaptations to Salt Stress: A Review. **Horticulturae**, v. 10, n. 11, p. 1221, 2024.

MALAVOLTA, E.; ROSOLEM, C. A. Exigências nutricionais do sorgo sacarino. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 38, n. 1, p. 257–268, 1981.

MANISHANKAR, P.; WANG, N.; KÖSTER, P.; ALATAR, A. A.; KUDLA, J. Calcium signaling during salt stress and in the regulation of ion homeostasis. **Journal of Experimental Botany**, v. 69, n. 17, p. 4215–4226, 2018.

MONTELEONE, M.; LIBUTTI, A. Salt Leaching Due to Rain in Mediterranean Climate: Is It Enough?. **Italian Journal of Agronomy**, v. 7, n. 1, p. e6, 2012.

MUHAMMAD, M.; WAHEED, A.; WAHAB, A.; MAJEED, M.; NAZIM, M.; LIU, Y.-H.; LI, L.; LI, W.-J. Soil salinity and drought tolerance: An evaluation of plant growth, productivity, microbial diversity, and amelioration strategies. **Plant Stress**, v. 11, p. 100319, 2024.

MUNNS, R.; JAMES, R. A.; LÄUCHLI, A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 5, p. 1025–1043, 2006.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of Salinity Tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. Volume 59, 2008, p. 651–681, 2008.

NAZ, M.; AFZAL, M. R.; RAZA, M. A.; PANDEY, S.; QI, S.; DAI, Z.; DU, D. Calcium (Ca²⁺) signaling in plants: A plant stress perspective. **South African Journal of Botany**, v. 169, p. 464–485, 2024.

NEGRÃO, S.; SCHMÖCKEL, S. M.; TESTER, M. Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. **Annals of Botany**, v. 119, n. 1, p. 1–11, 2017.

NETTO, A. de O. A.; GOMES, C. C. S.; LINS, C. C. V.; BARROS, A. C.; CAMPECHE, L. F. de S. M.; BLANCO, F. F. Características químicas e salino-sodicidade dos solos do Perímetro Irrigado Califórnia, SE, Brasil. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1640–1645, 2007.

PARIHAR, P.; SINGH, S.; SINGH, R.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 6, p. 4056–4075, 2015.

PARISA, D.; SAGERVANSI, A.; ABDALLA, M. A.; MÜHLING, K.-H. Na⁺/Mg²⁺ ratio: a new physiological trait for salt resistance in faba bean (*Vicia faba* L.). **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 1568, 2025.

PARK, H. J.; KIM, W.-Y.; YUN, D.-J. A New Insight of Salt Stress Signaling in Plant. **Molecules and Cells**, v. 39, n. 6, p. 447–459, 2016.

PILCHOVA, I.; KLACANOVA, K.; TATARKOVA, Z.; KAPLAN, P.; RACAY, P. The Involvement of Mg²⁺ in Regulation of Cellular and Mitochondrial Functions. **Oxidative Medicine and Cellular Longevity**, v. 2017, p. 6797460, 2017.

RAMOS, T. B.; DAROUICH, H.; OLIVEIRA, A. R.; FARZAMIAN, M.; MONTEIRO, T.; CASTANHEIRA, N.; PAZ, A.; ALEXANDRE, C.; GONÇALVES, M. C.; PEREIRA, L. S. Water use, soil water balance and soil salinization risks of Mediterranean tree orchards in southern Portugal under current climate variability: Issues for salinity control and irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 283, p. 108319, 2023.

ROY, S. J.; NEGRÃO, S.; TESTER, M. Salt resistant crop plants. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 26, Food biotechnology Plant biotechnology, p. 115–124, 2014.

SEIFIKALHOR, M.; ALINIAEIFARD, S.; SHOMALI, A.; AZAD, N.; HASSANI, B.; LASTOCHKINA, O.; LI, T. Calcium signaling and salt tolerance are diversely entwined in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v. 14, n. 11, p. 1665455, 2019.

SHABALA, S.; MUNNS, R. Salinity stress: physiological constraints and adaptive mechanisms. In: PLANT STRESS PHYSIOLOGY. 1. ed. UK: CABI, 2022. p. 59–93. Disponível em: <http://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/9781845939953.0059>. Acesso em: 25 jul. 2025.

SILVA, C. L. da; FERREIRA, R. de C. A. de B.; ALVAREZ-PIZARRO, J. C. Na⁺ exclusion and proline accumulation in *Urochloa* spp. cultivars. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e03131, 2023.

SILVA JÚNIOR, L. G. A. S.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. de. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÁGUAS DO CRISTALINO DO NORDESTE BRASILEIRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, p. 11–17, 1999.

SOUTO, A. G. de L.; CAVALCANTE, L. F.; MELO, E. N. de; CAVALCANTE, Í. H. L.; LIMA, G. S. de; MESQUITA, F. de O.; SILVA, L. dos S.; SILVA, B. da; RODRIGUES, L. S.; MESQUITA, E. F. de; GHEYI, H. R.; MELO, A. S. de. Propagation Methods and Mulching Modulate the Quantum Yield, Ionic Relations, and Production Components of Sour Passion Fruit under Salt Stress. **Horticulturae**, v. 9, n. 8, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-7524/9/8/871>. Acesso em: 22 fev. 2026.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed.: Artmed Editora, 2017.

TEAM, R. C. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 7 abr. 2025.

TONG, T.; LI, Q.; JIANG, W.; CHEN, G.; XUE, D.; DENG, F.; ZENG, F.; CHEN, Z.-H. Molecular Evolution of Calcium Signaling and Transport in Plant Adaptation to Abiotic Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 22, p. 12308, 2021.

TOVIGNAN, T. K.; BASHA, Y.; WINDPASSINGER, S.; AUGUSTINE, S. M.; SNOWDON, R.; VUKASOVIC, S. Precision Phenotyping of Agro-Physiological Responses and Water Use of Sorghum under Different Drought Scenarios. **Agronomy**, v. 13, n. 3, p. 722, 2023.

UKWATTA, J.; PABUAYON, I. C. M.; PARK, J.; CHEN, J.; CHAI, X.; ZHANG, H.; ZHU, J.-K.; XIN, Z.; SHI, H. Comparative physiological and transcriptomic analysis reveals salinity tolerance mechanisms in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Planta**, v. 254, n. 5, p. 98, 2021.

WANG, J.; LUO, Y.; YE, F.; DING, Z. J.; ZHENG, S. J.; QIAO, S.; WANG, Y.; GUO, J.; YANG, W.; SU, N. Structures and ion transport mechanisms of plant high-affinity potassium transporters. **Molecular Plant**, v. 17, n. 3, p. 409–422, 2024.

WANG, H.; ZHENG, C.; NING, S.; CAO, C.; LI, K.; DANG, H.; WU, Y.; ZHANG, J. Impacts of long-term saline water irrigation on soil properties and crop yields under maize-wheat crop rotation. **Agricultural Water Management**, v. 286, p. 108383, 2023.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in Plants. **Annals of Botany**, v. 92, n. 4, p. 487–511, 2003.

XIE, Q.; ZHOU, Y.; JIANG, X. Structure, Function, and Regulation of the Plasma Membrane Na⁺/H⁺ Antiporter Salt Overly Sensitive 1 in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 866265, 2022.

ZELM, E. van; ZHANG, Y.; TESTERINK, C. Salt Tolerance Mechanisms of Plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, n. Volume 71, 2020, p. 403–433, 2020.

ZHANG, H.; YU, F.; XIE, P.; SUN, S.; QIAO, X.; TANG, S.; CHEN, Chengxuan; YANG, S.; MEI, C.; YANG, D.; WU, Y.; XIA, R.; LI, X.; LU, J.; LIU, Y.; XIE, X.; MA, D.; XU, X.; LIANG, Z.; FENG, Z.; HUANG, X.; YU, H.; LIU, G.; WANG, Y.; LI, J.; ZHANG, Q.; CHEN, Chang; OUYANG, Y.; XIE, Q. A Gγ protein regulates alkaline sensitivity in crops. **Science**, v. 379, n. 6638, p. eade8416, 2023.

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, 2025. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1527952/full>. Acesso em: 6 fev. 2026.

ZHAO, D.; GAO, S.; ZHANG, X.; ZHANG, Z.; ZHENG, H.; RONG, K.; ZHAO, W.; KHAN, S. A. Impact of saline stress on the uptake of various macro and micronutrients and their associations with plant biomass and root traits in wheat. **Plant, Soil and Environment**, v. 67, n. 2, p. 61–70, 2021.

ZHAO, S.; ZHANG, Q.; LIU, M.; ZHOU, H.; MA, C.; WANG, P. Regulation of Plant Responses to Salt Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4609, 2021.

ZHENG, H.; DANG, Y.; DIAO, X.; SUI, N. Molecular mechanisms of stress resistance in sorghum: Implications for crop improvement strategies. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 23, n. 3, p. 741–768, 2024.

ZHU, J.-K. Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. **Cell**, v. 167, n. 2, p. 313–324, 2016.

ZHU, Y.; LI, M.; WANG, T.; WANG, J.; ZHOU, H.; LIN, Y.; YIN, C. Research advances of salt exclusion, salt sequestration, salt secretion, and salt signaling regulation in plants. **Plant Stress**, v. 17, p. 100952, 2025.

ZÖRB, C.; GEILFUS, C.-M.; DIETZ, K.-J. Salinity and crop yield. 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/plb.12884>. Acesso em: 28 jul. 2025.

CAPÍTULO II. TOLERÂNCIA DO SORGO SACARINO (*Sorghum bicolor*) AO DÉFICIT HÍDRICO E À SALINIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO: RELAÇÕES HÍDRICAS E PRODUÇÃO

RESUMO

Devido à sua tolerância ao déficit hídrico e à salinidade, o sorgo é considerado uma cultura adequada para cultivo em regiões afetadas por essas condições de estresse, permitindo o uso eficiente de recursos hídricos limitados. Este estudo avaliou a resiliência da cultivar de sorgo sacarino BRS 506 sob estresse hídrico e salino, com foco nas relações hídricas e no desempenho produtivo em condições semiáridas. Utilizou-se um delineamento experimental em blocos casualizados completos, em arranjo fatorial 3×3 com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em três níveis de salinidade da água de irrigação (1,50, 3,75 e 6,00 dS m^{-1}) e três níveis de irrigação (50%, 75% e 100% da evapotranspiração máxima estimada da cultura, ETc), correspondendo a déficits hídricos de 50%, 25% e 0% da ETc. O estresse salino resultou em extravasamento de eletrólitos semelhante nos dois anos. Em 2022, o teor relativo de água diminuiu com o aumento da salinidade, enquanto o déficit de saturação e a capacidade de absorção de água aumentaram. O maior extravasamento de eletrólitos ocorreu sob déficit hídrico de 25%. Em contraste, os parâmetros fisiológicos relacionados à água em 2021 permaneceram estáveis, apesar dos déficits hídricos. A produção de caldo diminuiu 13,38% no nível de salinidade mais alto (6,00 dS m^{-1}) em comparação com o mais baixo (1,50 dS m^{-1}). Sob condições de déficit hídrico, a produção total, a matéria seca, a biomassa do colmo e a produção de caldo foram comparáveis entre 0% e 25% de déficit hídrico, com reduções significativas apenas em 50%. No geral, a variedade BRS 506 demonstrou resiliência à salinidade, mantendo a integridade celular. Apesar dos efeitos adversos no estado hídrico da planta em alta salinidade, a produção total não foi afetada. Uma redução de 25% na irrigação resultou em uma perda de rendimento de apenas 6,64%, indicando uma melhoria na eficiência do uso da água e destacando o potencial para o cultivo sustentável de sorgo sacarino em ambientes com disponibilidade hídrica limitada.

PALAVRAS CHAVES: Estresse abiótico, sorgo BRS 506, estresse osmótico, região semiárida brasileira.

CHAPTER II. TOLERANCE OF SWEET SORGHUM (*Sorghum bicolor*) TO WATER DEFICIT AND IRRIGATION WATER SALINITY: WATER RELATIONS AND PRODUCTION

ABSTRACT

Due to its tolerance to water deficit and salinity, sorghum is considered a suitable crop for cultivation in regions affected by these stress conditions, enabling the efficient use of limited water resources. This study evaluated the resilience of the sweet sorghum cultivar BRS 506 under water deficit and salinity stress, focusing on water relations and yield performance in semiarid conditions. A randomized complete block design was employed in a 3×3 factorial arrangement with four replicates. Treatments consisted of three levels of irrigation water salinity (1.50, 3.75, and 6.00 dS m⁻¹) and three irrigation levels (50%, 75%, and 100% of the estimated maximum crop evapotranspiration, ET_c), corresponding to water deficits of 50%, 25%, and 0% of ET_c. Salinity stress resulted in similar electrolyte leakage in both years. In 2022, relative water content decreased with increasing salinity, whereas saturation deficit and water absorption capacity increased. The highest electrolyte leakage occurred under a 25% water deficit. In contrast, water-related physiological parameters in 2021 remained stable despite water deficits. Juice yield declined by 13.38% under the highest salinity level (6.00 dS m⁻¹) compared with the lowest (1.50 dS m⁻¹). Under water deficit conditions, total yield, dry matter, stalk biomass, and juice yield were comparable between 0% and 25% water deficit, with significant reductions only at 50%. Overall, BRS 506 demonstrated resilience to salinity, maintaining cellular integrity. Despite adverse effects on plant water status at high salinity, total yield was unaffected. A 25% irrigation reduction resulted in only a 6.64% yield loss, indicating improved water use efficiency and highlighting the potential for sustainable cultivation of sweet sorghum in water-limited environments.

KEYWORDS: abiotic stress, sorghum *BRS 506*, osmotic stress, Brazilian semiarid region

1. INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma cultura alimentar básica em muitos países, particularmente na África e na Ásia, e desempenha um papel significativo na indústria de biocombustíveis e como alimento para animais (Impa *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2023). Na região semiárida do Brasil, o sorgo é cultivado principalmente para a produção de forragem durante as estações chuvosa e seca, frequentemente com irrigação suplementar. Sua alta eficiência no uso da água contribui para uma elevada produtividade por unidade de água aplicada, o que é um fator chave que sustenta sua importância agrícola nessa região (Kirchner *et al.*, 2019). A resiliência e a adaptabilidade da cultura a diversas condições edafoclimáticas aumentam ainda mais sua relevância em ambientes desafiadores.

O sorgo sacarino tem sido estudado na região semiárida brasileira, sob irrigação, como alternativa à cana-de-açúcar para a produção de etanol (Ahmad Dar *et al.*, 2018; Martins *et al.*, 2025; Nazli *et al.*, 2024; Queiroz *et al.*, 2023; Sousa *et al.*, 2024), e também pode ser utilizado como forragem animal, principalmente na forma de silagem (Macêdo *et al.*, 2018). Devido ao alto teor de açúcares solúveis acumulados em seu colmo, sua tolerância ao estresse hídrico e salino pode diferir de outros tipos de sorgo.

Globalmente, os estresses abióticos, particularmente a salinidade e o déficit hídrico, são os principais fatores limitantes para a produtividade das culturas (Islam *et al.*, 2023; Punia *et al.*, 2020). Em regiões onde a disponibilidade de água é limitada e a água de irrigação é frequentemente de baixa qualidade (ou seja, salobra ou salina), as plantas que toleram tais condições são especialmente valiosas (Calone *et al.*, 2020; Islam *et al.*, 2023). O sorgo é classificado como moderadamente tolerante à salinidade, com limiares críticos de 4,5 dS m⁻¹ para água de irrigação e 6,8 dS m⁻¹ para salinidade do solo (Francois; Donovan; Maas, 1984). Níveis de salinidade que excedem esses limiares estão associados a reduções de rendimento de aproximadamente 16% por unidade de aumento na salinidade do solo (Tanji; Kielen, 2002). Essas características ressaltam a importância estratégica do cultivo de sorgo em áreas afetadas pela escassez hídrica e salinização.

A salinidade e o déficit hídrico induzem estresse osmótico nas células vegetais, desencadeando mecanismos adaptativos que contribuem para a tolerância ao estresse (Shalaby, 2024). As principais respostas fisiológicas incluem a compartimentalização celular, a síntese e o acúmulo de solutos orgânicos, a regulação do transporte iônico e o ajuste osmótico, todos desempenhando papéis cruciais na adaptação e sobrevivência das plantas em condições ambientais adversas (Punia *et al.*, 2020; Yang; Guo, 2018). Quando a salinidade e o déficit

hídrico ocorrem simultaneamente, seus efeitos combinados podem intensificar o estresse fisiológico experimentado pelas plantas. Isso se deve principalmente à redução do potencial hídrico do solo, que prejudica a absorção de água. A diminuição do potencial hídrico resulta tanto do efeito osmótico das altas concentrações de sal quanto do efeito mátrico associado à disponibilidade limitada de água. Consequentemente, a interação entre esses estresses abióticos dificulta ainda mais a absorção de água (Wang *et al.*, 2015; Yuan *et al.*, 2019), exacerbando as limitações fisiológicas da planta e diminuindo sua capacidade de manter a homeostase (Shalaby; Ramadan, 2024).

O estado hídrico das plantas é um indicador crítico de tolerância a estresses abióticos (Seleiman *et al.*, 2021). Parâmetros fisiológicos como extravasamento de eletrólitos (EL), conteúdo relativo de água (RWC), déficit de saturação hídrica (WSD), capacidade de retenção de água (WRC) e capacidade de absorção de água (WUC) são essenciais para manter a turgescência celular, a integridade da membrana, a estabilidade proteica e a funcionalidade metabólica geral em condições de limitação hídrica (Taiz *et al.*, 2017). A regulação eficaz da absorção, retenção e utilização de água aumenta a resiliência das plantas à seca, salinidade e outros estressores ambientais (Muhammad *et al.*, 2024).

Em condições de déficit hídrico, o crescimento das plantas é geralmente inibido, levando à redução da produtividade. Em resposta, o sorgo ativa mecanismos adaptativos de quiescência que conferem alta tolerância à seca (Dugas *et al.*, 2011). Essa estratégia permite que a cultura entre em um estado de dormência temporária durante períodos de escassez hídrica e retome o crescimento assim que as condições ambientais melhorarem (Assefa; Staggenborg; Prasad, 2010). Tal plasticidade fisiológica é uma característica adaptativa fundamental, permitindo que o sorgo mantenha a sobrevivência e a produtividade sob estresse transitório (Hadebe; Mabhaudhi; Modi, 2020), muitas vezes garantindo rendimentos em condições nas quais outras culturas falhariam.

Com base em sua conhecida adaptabilidade fisiológica, hipotetizamos que a cultivar *BRS 506* pode manter a integridade fisiológica e a produtividade estável sob condições de estresse moderado, exibindo alta eficiência no uso da água e tolerância à salinidade. Essa hipótese suscita duas questões centrais de pesquisa: (1) Como o déficit hídrico e a salinidade afetam as relações hídricas e os componentes de rendimento do sorgo, cultivar *BRS 506*? e (2) Em quais condições a cultivar é mais suscetível a esses estresses? Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a resiliência da *BRS 506* sob diferentes níveis de estresse hídrico e salino em condições semiáridas, com foco em seus efeitos sobre o estado hídrico da planta e parâmetros relacionados ao rendimento de açúcares.

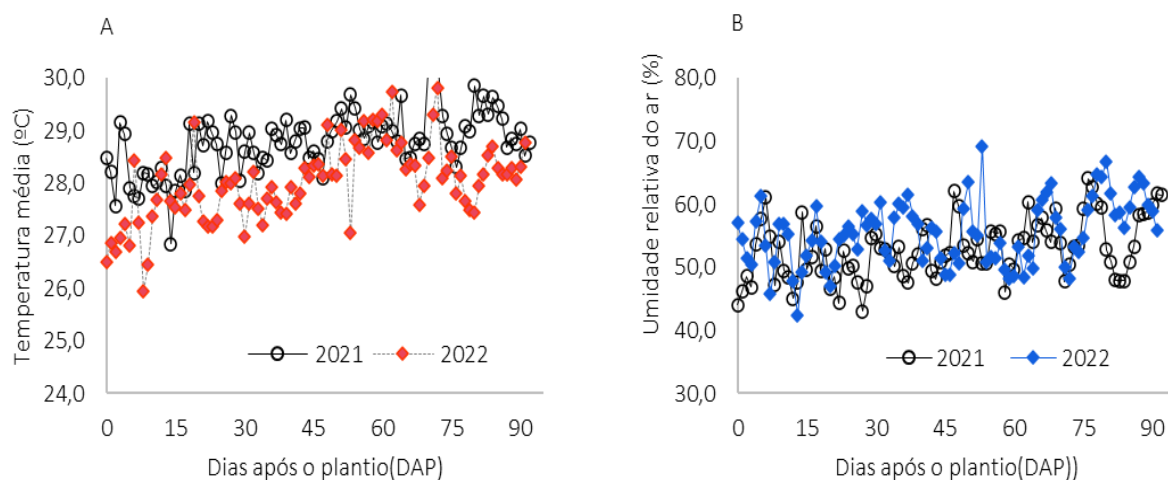
2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no sítio experimental de Cumaru, localizado no município de Upanema, Rio Grande do Norte, Brasil ($5^{\circ}33'30''$ S, $37^{\circ}11'56''$ O; altitude: 110 m). O cultivo foi realizado durante duas safras agrícolas, de setembro a dezembro de 2021 e 2022, que correspondem ao período mais seco do ano na região. O solo da área experimental é classificado como Cambissolo Háplico, com profundidade efetiva de aproximadamente 0,6 m. As propriedades físico-químicas do solo para as camadas avaliadas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo na área de estudo antes do experimento.

Prof	pH	CE _{es}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CTC	P
cm		dS m ⁻¹			cmolc dm ⁻³			mg dm ⁻³
0-20	7,50	0,90	480	1,50	0,35	0,46	7,11	1,50
20-40	7,20	0,80	5,10	1,60	0,39	0,45	7,54	8,00
Areia			Silte		Argila			
g kg ⁻								
0-20	190		44		766			
20-40	250		52		698			

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região apresenta um clima BSh, quente e semiárido (Alvares *et al.*, 2013), caracterizado por uma precipitação média anual de 633 mm nos últimos 30 anos, predominantemente concentrada entre fevereiro e maio, e uma temperatura média anual de 26°C (EMPARN, 2022). Durante o período experimental, os dados climáticos foram monitorados continuamente usando uma estação meteorológica instalada adjacente à área experimental (Figura 1).



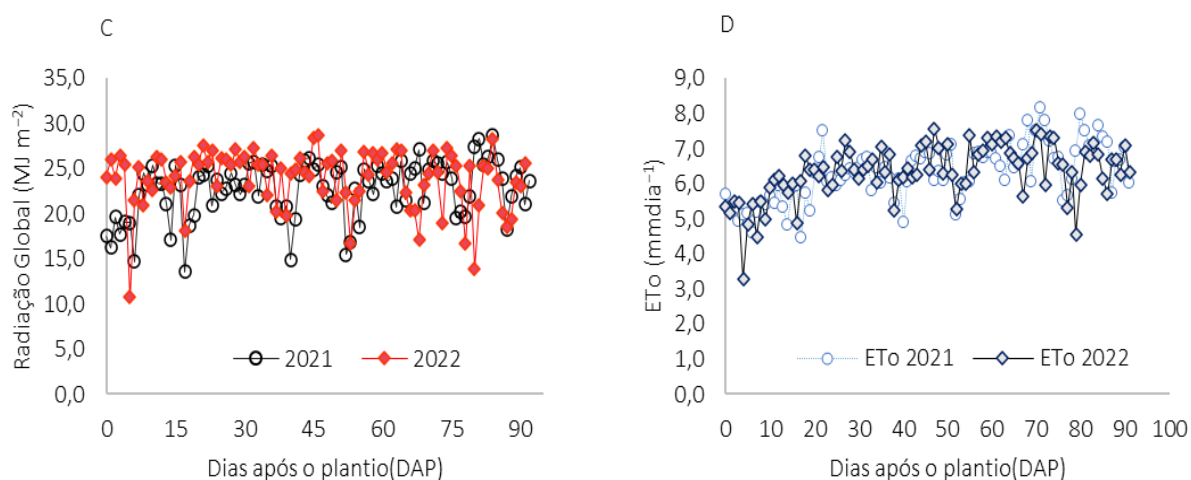


Figura 1. A temperatura média do ar (A), a umidade relativa (B), a radiação global (C) e a evapotranspiração de referência (ET₀) (D) foram registradas durante os dois ciclos de plantio (2021 e 2022) no local experimental.

A cultivar de sorgo utilizada neste estudo foi a *BRS 506*, desenvolvida pela Embrapa Milho e Sorgo para servir como matéria-prima alternativa complementar à cana-de-açúcar para a produção de etanol. Esta cultivar tem um ciclo de crescimento anual de 120 a 130 dias, atinge uma altura média de 280 cm e produz um rendimento médio de colmo variando de 40 a 60 Mg ha⁻¹, com rendimentos de matéria seca entre 15 e 20 Mg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2012).

Antes da instalação do experimento, a área foi preparada por meio de aração e gradagem, seguidas da abertura de sulcos de plantio e adubação de base com 150 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP; 11-52%), fornecendo nitrogênio, fósforo de acordo com a análise do solo e as necessidades nutricionais da cultura (Rosolem; Malavolta, 1981). A semeadura foi realizada manualmente, com 20 sementes por metro linear. O desbaste ocorreu 15 dias após o plantio para manter uma densidade de 10 plantas por metro linear, dispostas em espaçamento de fileira dupla de 1,35 m × 0,25 m × 0,10 m. Duas capinas manuais foram realizadas durante o ciclo da cultura para o controle de plantas daninhas. Durante o período de crescimento, foi aplicada fertirrigação para fornecer nutrientes adicionais. O nitrogênio foi fornecido na forma de ureia na taxa de 70 kg ha⁻¹, e o potássio na forma de KCl na taxa de 30 kg ha⁻¹ de K₂O. Os fertilizantes foram aplicados em três parcelas iguais aos 21, 28 e 35 dias após o plantio.

O experimento foi conduzido utilizando um delineamento em blocos casualizados completos em arranjo fatorial 3 × 3 com quatro repetições. Os fatores consistiram em três níveis de salinidade da água de irrigação (1,50, 3,75 e 6,00 dS m⁻¹) e três níveis de irrigação (50%, 75% e 100% da evapotranspiração máxima estimada da cultura, ET_c), correspondendo a déficits hídricos de 50%, 25% e 0% da ET_c, respectivamente. A eficiência de irrigação foi de

95%. Isso resultou em nove combinações de tratamentos e um total de 36 parcelas experimentais. Cada unidade experimental compreendeu duas fileiras duplas com 7,0 m de comprimento. A área útil da parcela foi definida pelas duas fileiras internas, excluindo-se 1,5 m em cada extremidade para minimizar os efeitos de borda.

A água de irrigação com o nível de salinidade mais baixo ($1,5 \text{ dS m}^{-1}$) foi obtida de um poço tubular. O nível de salinidade mais alto ($6,0 \text{ dS m}^{-1}$) foi selecionado com base no limiar de salinidade associado a uma redução de 60% no potencial de rendimento do sorgo (Ayers; Westcot, 1999). Para obter os tratamentos de salinidade intermediária e mais alta, soluções estoque foram preparadas em concentrações de 200 g L^{-1} para NaCl ($3,42 \text{ mol L}^{-1}$), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($1,36 \text{ mol L}^{-1}$) e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($0,81 \text{ mol L}^{-1}$). Essas soluções foram combinadas em proporções para atingir uma proporção iônica final de Na: Ca: Mg de 6,3: 2,7: 1, refletindo a composição iônica média da água do Aquífero Calcário de Jandaíra, uma fonte de água principal na região (Silva Júnior; Gheyi; Medeiros, 1999). Os níveis de salinidade na água de irrigação foram monitorados diariamente usando um medidor de condutividade portátil.

Foi empregado um sistema de irrigação por gotejamento, operando com uma vazão de $1,65 \text{ L h}^{-1}$ por emissor sob uma pressão de trabalho de 100 kPa, com um coeficiente de uniformidade de distribuição de 95%. Os emissores foram espaçados em intervalos de 0,20 e 0,30 m ao longo das linhas de gotejamento instaladas com espaçamento entre linhas de 1,6 m, permitindo a aplicação de profundidades de irrigação proporcionais aos tratamentos necessários. O planejamento da irrigação foi baseado em porcentagens de evapotranspiração da cultura (ET_c), estimadas a partir da evapotranspiração de referência diária (ET_0) utilizando o método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006). Os coeficientes de cultura diários (K_c) foram determinados utilizando a abordagem de K_c duplo. Os valores de ET_0 foram calculados utilizando dados meteorológicos coletados de uma estação meteorológica localizada adjacente à área experimental (Figura 1D). As profundidades totais de irrigação aplicadas ao longo do ciclo da cultura foram de 279, 393 e 498 mm em 2021, e de 299, 409 e 520 mm em 2022, correspondendo a 50%, 75% e 100% da ET_c , respectivamente. Durante a fase inicial de estabelecimento, uma profundidade uniforme de 44,2 mm foi aplicada em todos os tratamentos nos primeiros 9 dias do ciclo de 2021, e de 77,2 mm durante os primeiros 12 dias do ciclo de 2022. As médias semanais das lâminas de irrigação para o tratamento de irrigação completa, juntamente com os volumes totais de pré-irrigação aplicados em ambos os anos, são apresentadas na Figura 2.

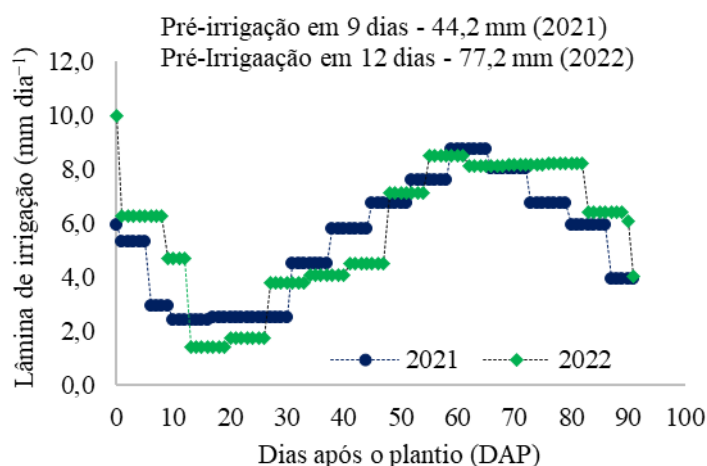


Figura 2. Lâminas diárias de irrigação aplicadas à cultivar de sorgo *BRS 506* nos dois ciclos de plantio, 2021 e 2022, no município de Upanema, RN.

Variáveis fisiológicas relacionadas ao estado hídrico das plantas foram avaliadas durante a fase de frutificação, aos 61 dias após o plantio (DAP). Para a análise extravasamento de eletrólitos (EL), folhas diagnósticas a quarta folha foram coletadas de cinco plantas por parcela. Destas, dez discos foliares (área total: 0,79 cm²) foram excisados e imersos em água deionizada. Após um período de repouso de 1 h a 25 °C, a condutividade elétrica inicial (CE_i) da solução foi medida. As amostras foram então colocadas em banho-maria a 85 °C por 4 h, resfriadas a 25 °C e a condutividade elétrica final (CE_f) foi registrada. O extravasamento de eletrólitos foi calculada como a razão entre os dois valores de condutividade, de acordo com a Eq. (1) (Scotti Campos *et al.*, 2013).

$$EL = \left(1 - \frac{EC_i}{EC_f}\right) \times 100 \quad (1)$$

O teor relativo de água (RWC) e outras variáveis fisiológicas relacionadas à água foram medidos utilizando as mesmas folhas diagnósticas previamente amostradas para extravasamento de eletrólitos. De cada parcela, quinze discos foliares (área total: 0,79 cm² por disco) foram retirados e imediatamente pesados em uma balança de precisão para obtenção do peso fresco (PF). Os discos foram então imersos em água deionizada por 24 h. Após esse período, a umidade superficial foi delicadamente removida com papel absorvente e os discos foram pesados novamente para determinar o peso túrgido (PT). Posteriormente, as amostras foram secas em sacos de papel em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C até atingirem peso constante, obtendo-se o peso seco (PS). Os pesos fresco, túrgido e seco foram utilizados para calcular os seguintes parâmetros: teor relativo de água (RWC) (Barrs;

Weatherley, 1962), déficit de saturação hídrica (WSD) (Saneoka *et al.*, 1995), capacidade de retenção de água (WRC) (Brag, 1972) e capacidade de absorção de água (WUC) (Hasan *et al.*, 2019). As respectivas fórmulas são fornecidas abaixo:

$$RWC = \frac{\text{Fresh weight} - \text{Dry weight}}{\text{Turgid weight} - \text{Dry weight}} \times 100 \quad (2)$$

$$WSD = 100 - RWC \quad (3)$$

$$WRC = \frac{\text{Turgid weight}}{\text{Dry weight}} \quad (4)$$

$$WUC = \frac{\text{Turgid weight} - \text{Dry weight}}{\text{Dry weight}} \quad (5)$$

A colheita foi realizada 92 dias após o plantio, correspondendo ao estágio ideal para a produção de silagem e extração de sacarose, em ambos os ciclos experimentais. As plantas foram coletadas em uma seção de 3 m de comprimento da área útil da parcela para avaliação da produtividade, porcentagem de colmo e extração de caldo. Somente plantas com diâmetro do colmo superior a 1,0 cm foram consideradas; aquelas com diâmetros menores foram descartadas. A biomassa colhida (folhas, colmos e inflorescências) foi pesada no campo utilizando uma balança digital portátil de gancho (capacidade de 50 kg, resolução de 10 g). Para determinar o teor de matéria seca, seis plantas representativas por parcela foram amostradas, Subamostras frescas foram colocadas em estufa de ar forçado a 65 °C até atingirem peso constante. A produtividade total de matéria seca (Mg ha⁻¹) foi calculada multiplicando-se a produtividade de biomassa fresca pelo teor de matéria seca.

Para estimar a produção de colmos, quatro plantas por parcela foram colhidas, e suas folhas e inflorescências foram removidas. Os colmos foram pesados separadamente para determinar a proporção do colmo em relação à biomassa da aérea total, também foi calculada a produção de colmos. A extração do caldo foi realizada utilizando moinhos mecânicos. O caldo extraído foi pesado e sua proporção em relação à massa total do colmo foi expressa em porcentagem. Após a extração do caldo, uma amostra do bagaço residual, o material fibroso remanescente após a remoção do caldo, foi coletada e seca em estufa a 105 °C até peso constante para determinar seu teor de matéria seca e estimar o teor de umidade. Com base na umidade do bagaço, o teor potencial de caldo residual foi calculado, considerando uma eficiência de recuperação de caldo de 90,5%, como tipicamente adotado na indústria (CONSECANA, 2006).

Os dados foram inicialmente testados quanto à normalidade utilizando o teste de Shapiro-Wilk com um nível de significância de 5%. Posteriormente, os dados dos experimentos de 2021 e 2022 foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Uma análise conjunta dos dois anos

foi realizada quando a razão entre o maior e o menor quadrado médio dos resíduos foi ≤ 7 , utilizando o pacote *easynova* (Arnhold, 2024). Quando a ANOVA indicou efeitos significativos, as médias dos tratamentos foram comparadas utilizando o teste de Tukey com $p \leq 0,05$, implementado com o pacote *ExpDes.pt* (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2014). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R, versão 4,4 (Team, 2024).

3. RESULTADOS

3.1 Efeitos dos estresses salino e hídrico nas relações hídricas das plantas

De acordo com a análise de variância (Tabela 2), o extravasamento de eletrólitos, a capacidade de retenção de água e o teor relativo de água, tanto em 2021 quanto em 2022, não foram significativamente afetados pela salinidade da água de irrigação. No entanto, observou-se um efeito significativo da salinidade no teor relativo de água em 2022, bem como no déficit de saturação hídrica e na capacidade de absorção de água em ambos os anos ($p \leq 0,01$). Em relação ao déficit hídrico de irrigação, detectou-se um efeito significativo em 2022 para o extravasamento de eletrólitos, o teor relativo de água, o déficit de saturação hídrica e a capacidade de absorção de água ($p \leq 0,01$), enquanto nenhum efeito significativo foi observado em 2021. Quanto à interação entre salinidade e déficit hídrico, um efeito significativo foi encontrado apenas para a capacidade de retenção de água em 2022 ($p \leq 0,01$).

Tabela 2. Resumo da análise de variância para extravasamento de eletrólitos (EL), teor relativo de água (RWC), déficit de saturação hídrica (WSD), capacidade de retenção de água (WRC) e capacidade de absorção de água (WUC) da cultivar *BRS 506 de Sorghum bicolor* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico e estresse salino.

SV	GF	Quadrado médio									
		EL 2021	EL 2022	RWC 2021	RWC 2022	WSD 2021	WSD 2022	WRC 2021	WRC 2022	WUC 2021	WUC 2022
Bloco	3	122,07*	47,09**	108,04*	4,11 ^{ns}	1,60 ^{ns}	4,12 ^{ns}	0,041 ^{ns}	0,003 ^{ns}	0,014*	0,002 ^{ns}
S	2	10,17 ^{ns}	1,44 ^{ns}	1,22	48,08**	37,77**	48,05**	0,002 ^{ns}	0,016 ^{ns}	0,043**	0,031**
D	2	32,42 ^{ns}	17,63**	8,39	27,06**	4,68 ^{ns}	27,07**	0,002 ^{ns}	0,020 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,02**
S x D	4	53,42 ^{ns}	2,76 ^{ns}	18,03	7,79 ^{ns}	8,03 ^{ns}	7,79 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,026*	0,003 ^{ns}	0,006 ^{ns}
Resíduo	4	26,99	2,95	31,29	4,09	3,02	4,10	0,026	0,009	0,005	0,003
CV		21,29	18,77	6,04	2,20	28,29	24,84	4,65	2,55	41,81	24,34
Média		24,40	9,15	92,56	91,85	6,14	8,15	3,45	3,63	0,16	0,21

SV – fonte de variação; DF – graus de liberdade; CV – coeficiente de variação; E – experimento; S – salinidade da água de irrigação; D – déficit hídrico; T – tratamento; B – bloco; Relação – relação entre a soma residual dos quadrados dos experimentos realizados em ambos os anos, *e ** indicam diferenças estatisticamente significativas em $0,05 \geq p > 0,01$ e $p \leq 0,01$, respectivamente, de acordo com o teste F,

Os parâmetros de relações hídricas, extravasamento de eletrólitos, teor relativo de água, déficit de saturação hídrica e capacidade de absorção de água foram avaliados sob diferentes condições de salinidade da água de irrigação. O extravasamento de eletrólitos (Figura 3A) apresentou padrões semelhantes nos dois períodos de avaliação, sem diferenças significativas entre os níveis de salinidade. Em contraste, o teor relativo de água (RWC) nas folhas não apresentou variação significativa em 2021; entretanto, em 2022, o RWC foi significativamente afetado pelos níveis de condutividade elétrica (CEa) da água de irrigação (Figura 3B). Especificamente, o RWC diminuiu sob salinidades de 3,8 e 6,0 dS m^{-1} , com valores em torno de 90,07%, que foram significativamente menores do que o RWC observado em 1,5 dS m^{-1} , onde atingiu 94,15%.

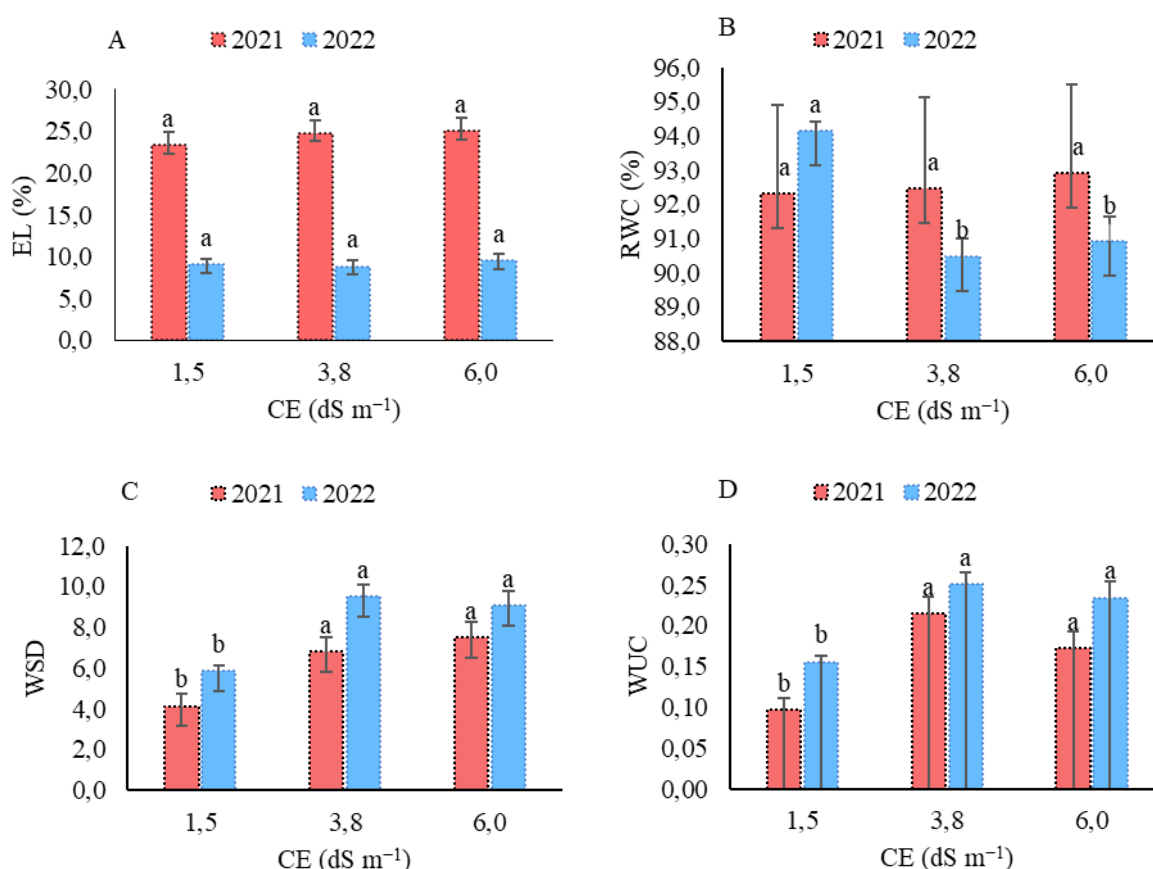


Figura 3. Vazamento de eletrólitos (A), teor relativo de água (B), déficit de saturação hídrica (C) e capacidade de absorção de água (D) na cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de estresse salino. médias seguidas pela mesma letra 'a-b', dentro de

cada ano, não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$),

Para o déficit de saturação hídrica (WSD), que é inversamente proporcional ao teor relativo de água (RWC), o parâmetro reflete o grau de estresse hídrico experimentado pelas plantas. Em ambas as estações de crescimento, o WSD seguiu um padrão semelhante, com diferenças significativas observadas em condições de maior salinidade (Figura 3C). No nível de salinidade mais baixo ($1,5 \text{ dS m}^{-1}$), os valores de WSD foram de 4,128 e 5,851 em 2021 e 2022, respectivamente, significativamente menores em comparação com os tratamentos de maior salinidade, indicando redução do estresse hídrico nas plantas.

Os maiores valores de WSD foram registrados em $3,8 \text{ dS m}^{-1}$ em 2022 e $6,0 \text{ dS m}^{-1}$ em 2021, correspondendo a aumentos de 9,53% e 9,06%, respectivamente, em comparação com o tratamento de menor salinidade. Para a capacidade de absorção de água (WUC), observou-se uma tendência semelhante em ambos os anos (Figura 3D), com os valores mais altos registrados sob estresse salino a $3,8 \text{ dS m}^{-1}$. Esse tratamento resultou em aumentos de 0,22% em 2021 e 0,25% em 2022, que não diferem dos valores observados na CE mais alta (6,0), mas são superiores aos registrados no nível de salinidade mais baixo.

Em relação aos efeitos isolados do estresse hídrico, o extravasamento de eletrólitos (EL) em 2021 não apresentou diferenças significativas entre os níveis de déficit hídrico (Figura 4A), indicando uma resposta uniforme entre os tratamentos. Em contraste, em 2022, foram observadas diferenças significativas entre os níveis de déficit, com maior extravasamento (10,52%) sob restrição hídrica de 25%, em comparação com 8,31% e 8,6% sob os níveis de restrição de 0% e 50%, respectivamente. Para o estado hídrico da planta, avaliado pelo teor relativo de água (RWC), também foram observadas diferenças significativas em 2022 (Figura 4B). A restrição hídrica de 50% levou ao menor RWC (90,15%), indicando uma redução mais acentuada na hidratação foliar sob estresse hídrico severo. Em comparação, os tratamentos com déficit hídrico de 0% e 25% apresentaram valores de RWC mais elevados, de 92,99% e 92,42%, respectivamente.

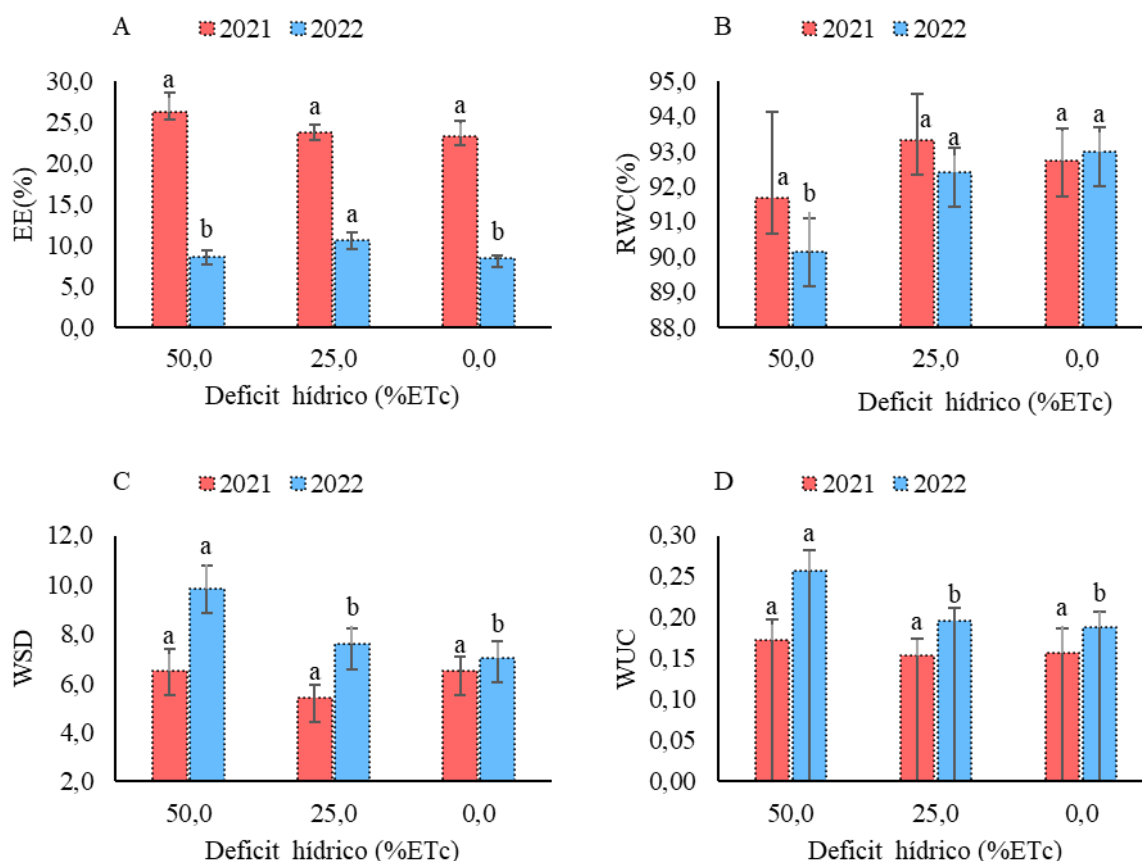


Figura 4. Vazamento de eletrólitos (A), teor relativo de água (B), déficit de saturação hídrica (C) e capacidade de absorção de água (D) na cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra 'a-b' dentro de cada ano não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 12$).

As variáveis WSD e WUC apresentaram comportamento semelhante em 2021 (Figura 4C, D), sem efeitos significativos dos níveis de déficit hídrico aplicados, permanecendo estáveis entre os tratamentos. Em contraste, em 2022, foram observadas diferenças significativas. Um déficit hídrico de 50% levou ao aumento do WSD e à redução do WUC, indicando maior dificuldade na absorção de água pelas plantas sob condições de estresse hídrico mais severo.

O efeito interativo do déficit hídrico e da salinidade na capacidade de retenção de água (Figura 5) revelou que, sob a combinação de um déficit hídrico de 25% e condutividades elétricas (CEa) da água de irrigação de 3,8 e 6,0 dS m^{-1} houve uma redução significativa de 0,23 na CRA em comparação com a CEa de 1,5 dS m^{-1} . Esse resultado indica um impacto maior

de condições salinas mais severas. Sob as demais combinações de tratamento, as plantas demonstraram resiliência, mantendo uma capacidade de retenção de água estável nas folhas.

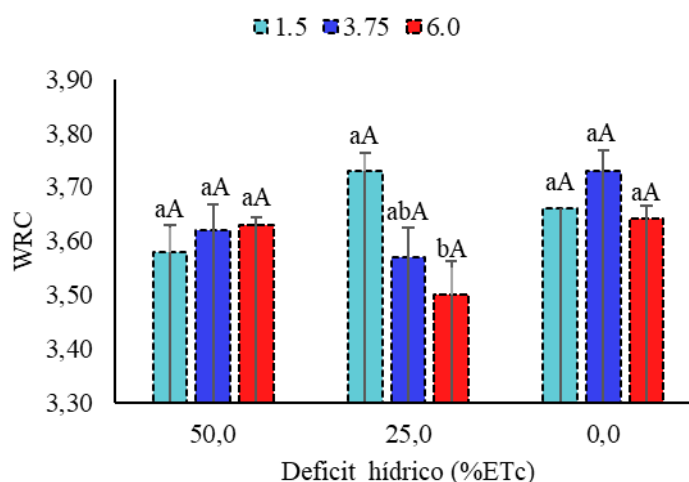


Figura 5. Capacidade de retenção de água (CRA) da cultivar de sorgo *BRS 506* na safra de 2022 sob condições combinadas de déficit hídrico e estresse salino. Médias seguidas pela mesma letra minúscula 'a-b' (comparação dos níveis de salinidade dentro de cada déficit hídrico) e pela letra maiúscula 'A' (comparação dos déficits hídricos dentro de cada nível de salinidade) não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 4$).

3.2 Produtividade de biomassa e de caldo

A análise conjunta das variáveis de produção (Tabela 3) não revelou interação significativa entre os tratamentos (T) e os experimentos (E), nem entre a salinidade (S) e o déficit hídrico (D). Para a produtividade total, a porcentagem de massa do colmo na planta e a produtividade do colmo, não foram detectadas diferenças significativas entre os períodos experimentais. No entanto, a produtividade de massa seca ($p \leq 0,05$), assim como a massa seca, o teor de caldo e a massa de caldo ($p \leq 0,01$), diferiram significativamente entre os dois ciclos de cultivo. Em relação à salinidade, foram observados efeitos significativos ($p \leq 0,05$) para a produtividade total, a massa seca e a massa de caldo, enquanto as demais variáveis não foram afetadas. Em contrapartida, o déficit hídrico influenciou significativamente a produtividade total, a massa seca, a massa do colmo e a massa de caldo ($p \leq 0,01$), sem efeitos significativos sobre as demais variáveis. Embora a análise de variância tenha indicado um efeito significativo da salinidade no rendimento total ($p \leq 0,05$), o teste de comparação de médias não revelou diferenças significativas entre os níveis de salinidade.

Tabela 3. Resumo da ANOVA da análise conjunta para produtividade total, produtividade de massa seca (produtividade de MS), produtividade de colmo e produtividade de caldo, bem como o teor médio de massa seca da planta inteira (MSC), teor de massa seca do colmo (TMSC) e teor de caldo, para as safras de 2021 e 2022 do sorgo *BRS 506* sob condições de déficit hídrico e estresse salino.

SV	GF	Quadrado médio						
		Rend Total	DM	Rend Colmo	Rend Caldo	MSC	TMSC	Teor Caldo
		(Mg ha ⁻¹)				(%)		
(E)	1	19,11 ^{ns}	21,08 [*]	28,58 ^{ns}	211,15 ^{**}	155,26 ^{**}	29,44 ^{ns}	3285,49 ^{**}
(S)	2	113,66 [*]	6,19 ^{ns}	58,99 ^{ns}	25,64 [*]	14,48 [*]	26,43 ^{ns}	44,77 ^{ns}
(D)	2	550,50 ^{**}	33,49 ^{**}	270,19 ^{**}	85,43 ^{**}	5,86 ^{ns}	21,56 ^{ns}	47,76 ^{ns}
S x D	4	57,44 ^{ns}	7,78 ^{ns}	22,81 ^{ns}	6,87 ^{ns}	4,10 ^{ns}	26,43 ^{ns}	5,10 ^{ns}
T:E	8	33,81 ^{ns}	3,02 ^{ns}	15,86 ^{ns}	3,48 ^{ns}	2,76 ^{ns}	36,42 ^{ns}	15,13 ^{ns}
E:B	6	58,52 ^{ns}	4,77 ^{ns}	24,78 ^{ns}	19,58 ^{ns}	5,99 ^{ns}	13,6 ^{ns}	61,24 ^{ns}
Resíduo	8	24,92	3,42	11,55	4,17	4,43	15,89	16,24
CV	-	10,58	13,47	11,29	14,31	7,23	6,26	8,47
Relação	-	3,31	5,00	1,74	3,77	6,27	1,24	2,04
Média	-	47,20	13,74	30,11	14,28	29,13	32,50	47,43

SV – fonte de variação; DF – graus de liberdade; CV – coeficiente de variação; E – experimento; S – salinidade da água de irrigação; D – déficit hídrico; T – tratamento; B – bloco; Relação – relação entre a soma residual dos quadrados dos experimentos realizados em ambos os anos, *e ** indicam diferenças estatisticamente significativas em $0,05 \geq p > 0,01$ e $p \leq 0,01$, respectivamente, de acordo com o teste F,

3.2 Efeito da salinidade na produtividade

O teor de massa seca do sorgo sacarino (Figura 6A) diferiu significativamente apenas entre as condutividades elétricas da água de irrigação (CEa) de 3,75 e 1,50 dS m⁻¹. O aumento da salinidade da água de irrigação levou a um maior acúmulo de massa seca da planta, com valores atingindo 29,93% e 29,10% nos níveis mais altos de salinidade. Em contraste, na CEa mais baixa (1,50 dS m⁻¹), o teor de massa seca foi de 28,38%, representando uma redução de 5,47% em comparação com os tratamentos de maior salinidade.

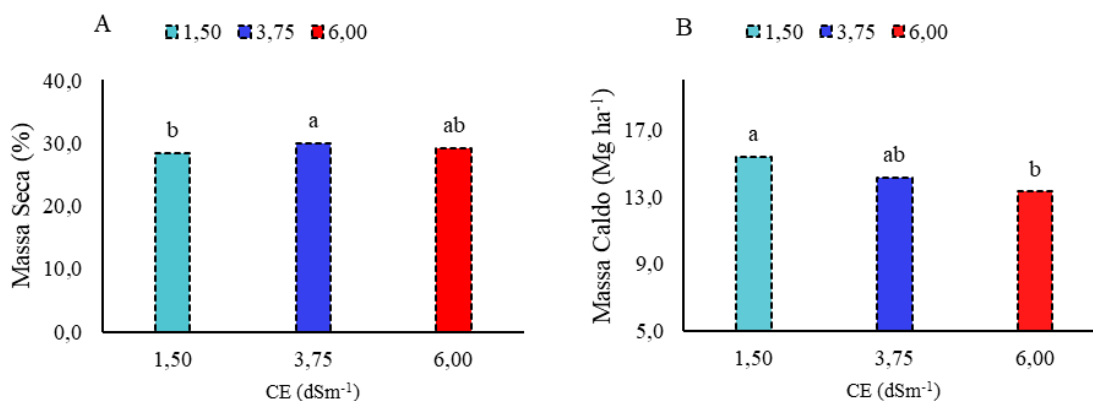


Figura 6. Teor de massa seca (A) e rendimento de caldo (B) da cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de estresse salino. Médias seguidas pela

mesma letra 'a-b' não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 24$).

O rendimento de caldo (Figura 6B), correspondente à quantidade extraída dos talos de sorgo sacarino, também apresentou diferença estatisticamente significativa sob estresse salino. Na menor CEw ($1,50 \text{ dS m}^{-1}$), o rendimento de caldo foi de $15,37 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto na maior salinidade ($6,0 \text{ dS m}^{-1}$), diminuiu para $13,31 \text{ Mg ha}^{-1}$. Essa redução corresponde a uma diminuição de apenas 13,38% no volume de caldo, apesar da elevada salinidade.

3.3 Efeito do estresse hídrico na produtividade

A produtividade total (Figura 7A) e a produção de matéria seca (Figura 7B) do sorgo sacarino diminuíram com o aumento do déficit hídrico. Quando o déficit hídrico atingiu 50%, a produtividade total caiu de $51,79$ para $42,03 \text{ Mg ha}^{-1}$, e a produção de matéria seca diminuiu de $14,79$ para $12,46 \text{ Mg ha}^{-1}$, correspondendo a reduções de 18,37% e 15,75%, respectivamente. Sob déficit hídrico moderado (25%), a produtividade total diminuiu em $3,42 \text{ Mg ha}^{-1}$, representando uma redução de 6,64%.

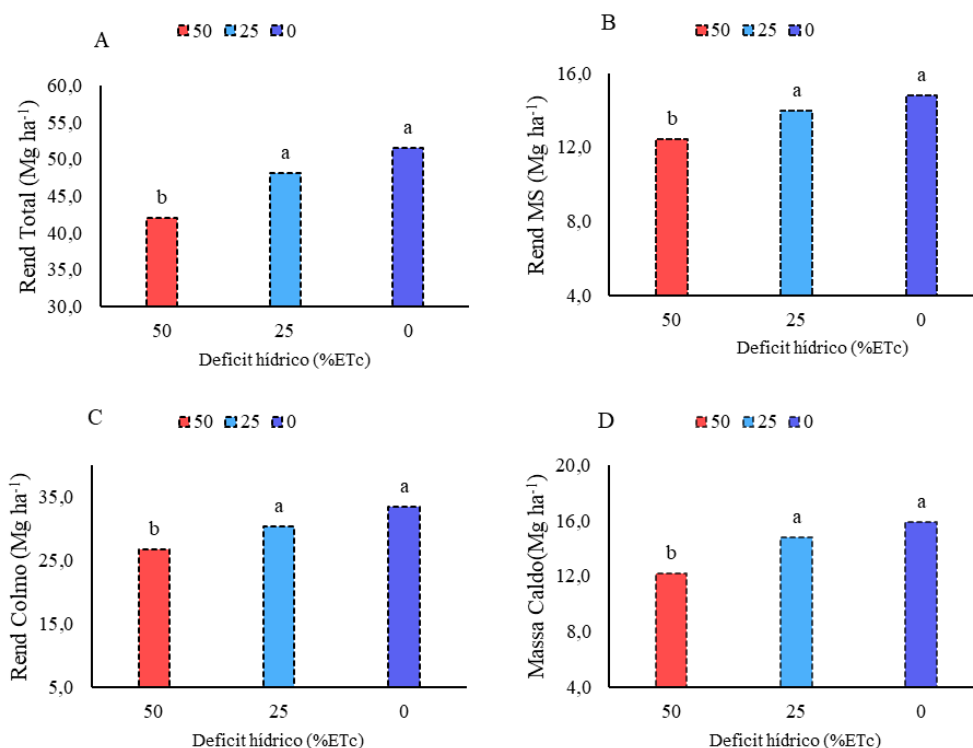


Figura 7. Produtividade total (A), produtividade de massa seca (B), produtividade de colmos (C) e produtividade de caldo (D) da cultivar de sorgo *BRS 506* durante as safras de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico. Médias seguidas pela mesma letra 'a-b' não diferem significativamente de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média ($n = 14$),

A aplicação de um déficit hídrico de 50% em relação à necessidade hídrica da cultura do sorgo resultou em reduções de 5,76% e 15,75% na produção de matéria seca (Figura 7B), em comparação com o tratamento de déficit de 25% e a condição sem estresse, respectivamente. No entanto, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos com déficit de 25% e sem estresse. Para avaliar o impacto do déficit hídrico na cultivar de sorgo sacarino BRS 506, a produção de colmo e de caldo também foi avaliada (Figura 7C, D), mostrando reduções de 20,09% e 23,18%, respectivamente, sob o déficit de 50%. Em contraste, a produção sob o déficit de 25% permaneceu estável.

Ao comparar os valores médios entre os experimentos de 2021 e 2022, observou-se um efeito significativo ($p \leq 0,05$) para o rendimento de matéria seca, rendimento de caldo, teor de matéria seca e teor de caldo (Tabela 4). Em contrapartida, não foram encontradas diferenças significativas entre os anos para o rendimento total de massa fresca e o rendimento de talos. Em 2021, foram registrados valores mais elevados para o rendimento de massa seca, rendimento de caldo e percentuais de massa seca e caldo.

Tabela 4. Valores médios de rendimento biomassa fresca total, massa seca total, colmo, massa de caldo e teor de caldo para a cultivar de sorgo *BRS 506* no ciclo de cultivo de 2021 e 2022 sob condições de déficit hídrico e estresse salino.

Ano	Rend Total	Rend Massa Seca	Rend Colmo	Rend Caldo	Massa de Caldo	Teor de Caldo
	(Mg ha ⁻¹)				(%)	
2021	46,68 ± 7,93 ^a	14,28 ± 2,65 ^a	29,48 ± 5,34 ^a	15,99 ± 3,35 ^a	30,60 ± 2,82 ^a	54,18 ± ^a
2022	47,71 ± 5,79 ^a	13,20 ± 1,53 ^b	30,74 ± 4,08 ^a	12,56 ± 2,41 ^b	27,66 ± 1,19 ^b	40,67 ± ^b

A média seguida pela mesma letra 'a-b' não difere estatisticamente no teste de Tukey ($p \leq 0,05$), o erro padrão da média n = 36,

4. DISCUSSÃO

Estresses abióticos, como salinidade e déficit hídrico, afetam diversos processos fisiológicos em plantas, reduzindo, em última instância, o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade. O extravasamento de eletrólitos da membrana plasmática é um indicador chave da tolerância da planta ao estresse salino, visto que a membrana é o principal local de danos causados por íons tóxicos (Ashraf; Ali, 2008; Hniličková *et al.*, 2019; Mansour; Salama, 2004). O sorgo, classificado como uma espécie moderadamente tolerante ao sal (Mansour *et al.*, 2021), manteve a integridade da membrana em condições salinas, mesmo quando a

condutividade elétrica (CE) da água de irrigação atingiu $6,0 \text{ dS m}^{-1}$. Essa resposta reforça a tolerância inerente da espécie à salinidade.

A perda de eletrólitos é uma característica importante intimamente associada à tolerância ao estresse e ao desempenho da produtividade em plantas (Hniličková *et al.*, 2019). O aumento da concentração de sais na água de irrigação reduz o potencial hídrico do solo, levando à perda da pressão de turgor nas células vegetais e, consequentemente, à diminuição da absorção de água (Mansour *et al.*, 2021). Como resultado, o teor relativo de água (RWC) nas folhas diminui, conforme observado na safra de 2022. No entanto, o sorgo demonstra a capacidade de realizar o ajuste osmótico, mantendo a pressão de turgor e o RWC, além de regular a condutância estomática, como relatado anteriormente (Calone *et al.*, 2020; Huang, 2018; Mansour *et al.*, 2021; Punia *et al.*, 2020; Rastogi *et al.*, 2020). A redução do RWC em condições de maior salinidade não resultou em uma diminuição correspondente na produtividade (Tabela 3), confirmando ainda mais a tolerância da cultura ao estresse salino (Ayers; Westcot, 1985; Calone *et al.*, 2020; Mansour *et al.*, 2021). Na maioria das culturas, o RWC é mantido acima de 85% durante o crescimento ativo (Gaff; Oliver, 2013), enquanto valores entre 60% e 30% geralmente indicam o início de danos nos tecidos.

Os maiores valores de WSD foram registrados em 2022 (9,53%) e 2021 (9,06%) sob níveis de salinidade da água de irrigação de 3,8 e $6,0 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente. Valores mais baixos de WSD indicam melhor estado hídrico da planta, o que favorece o crescimento e leva a rendimentos significativamente maiores, conforme relatado por (Islam *et al.*, 2023). A capacidade de absorção de água (WUC) reflete a eficiência da planta em absorver água por unidade de peso seco em um determinado estágio de desenvolvimento (Islam *et al.*, 2023). Sob estresse salino, as plantas exercem maior esforço fisiológico para absorver água devido ao aumento da demanda metabólica. Essa descoberta é consistente com os resultados de (Islam *et al.*, 2021; Islam, *et al.*, 2023), que estudaram feijão-mungo e relataram que genótipos mais tolerantes ao sal apresentaram valores de WUC mais baixos.

A capacidade de retenção de água (WRC) reflete a quantidade de água que uma folha pode reter sob condições fisiológicas e ambientais específicas. Os resultados indicam que diferenças significativas na WRC foram observadas apenas sob um déficit hídrico de 25% combinado com níveis de CEa de 3,8 e $6,0 \text{ dS m}^{-1}$. Sob maior estresse salino, os valores de WRC foram menores, sugerindo uma redução no tamanho das células como resultado do estresse (Martínez *et al.*, 2007). Em condições hídricas ótimas, as plantas são mais capazes de reparar células danificadas e manter valores de WRC mais elevados (Islam, *et al.*, 2023). O sorgo apresenta forte adaptabilidade a condições adversas de salinidade e déficit hídrico,

permitindo-lhe manter níveis de produtividade aceitáveis com perdas mínimas, como evidenciado na Tabela 3.

O principal efeito do déficit hídrico nas relações hídricas das plantas é a redução do teor de água nos tecidos celulares (Djanaguiraman *et al.*, 2020). Apesar desse impacto, os valores observados permaneceram dentro de uma faixa considerada fisiologicamente aceitável, visto que níveis abaixo de 20% indicam danos limitados à membrana celular e preservação da integridade celular. O teor relativo de água (RWC) é um indicador confiável do estado hídrico das folhas e é diretamente influenciado pela disponibilidade de água, tipicamente diminuindo em condições de déficit hídrico (Mohammadi *et al.*, 2023). Mesmo com uma redução de 50% no suprimento de água, o sorgo manteve valores de RWC acima de 85%, o que é suficiente para prevenir danos durante o crescimento ativo (Gaff; Oliver, 2013). Isso reforça a capacidade da mecanismos fisiológicos (Mansour *et al.*, 2021). Em contraste, culturas que não apresentam essa tolerância, como relatado por (Abdelaal *et al.*, 2018; El-Tayeb, 2005; Mahlooji *et al.*, 2018), sofrem reduções significativas no RWC, aumento do extravasamento de eletrólitos (EL) e interrupção de processos morfofisiológicos, levando, em última instância, à perda de produtividade.

No nível de salinidade mais baixo, o teor de massa seca foi de 28,38%, enquanto um aumento na CEw para 6,0 dS m⁻¹ resultou em um aumento de 5,47% no acúmulo de massa seca. Embora muitas espécies vegetais apresentem redução na massa seca sob estresse salino, o sorgo possui mecanismos fisiológicos e bioquímicos que lhe permitem tolerar a salinidade (Mansour *et al.*, 2021). Esse comportamento também foi relatado por (Silva *et al.*, 2023), que observou que a massa seca permaneceu estável em diferentes níveis de salinidade. No entanto, sob condições salinas mais severas, a massa seca pode diminuir devido a alterações nos parâmetros biométricos da planta (Roy *et al.*, 2018). O sorgo sacarino compartilha semelhanças com a cana-de-açúcar, particularmente em seus colmos suculentos, ricos em água e açúcares (Sousa *et al.*, 2024). Neste estudo, o sorgo demonstrou resiliência à salinidade, mantendo os processos fisiológicos e exibindo características associadas à tolerância ao estresse salino.

A redução na produtividade total sob uma condição de déficit hídrico de 25% correspondeu a 3,42 Mg ha⁻¹, representando uma diminuição de 6,64%. Apesar dessa perda, o resultado é considerado positivo, dada a disponibilidade limitada de água para irrigação. A cultura respondeu eficientemente ao déficit imposto, visto que uma redução de 50% na profundidade de irrigação resultou em perdas de produtividade de apenas 18,37% para biomassa fresca e 15,75% para biomassa seca, aproximadamente três vezes maiores do que as perdas observadas sob déficit moderado. Esses resultados superam os relatados por (Bhattarai

et al., 2020) para sorgo forrageiro, milho e milho cultivados sob condições semelhantes de déficit hídrico. No entanto, foram inferiores às produtividades totais, que variaram de 75,93 a 71,66 Mg ha⁻¹, relatadas para a cultivar de sorgo forrageiro IPA SF-15 sob níveis de déficit hídrico de 24% e 50% em condições semiáridas (Silva *et al.*, 2023).

Os valores de massa seca observados neste estudo foram inferiores aos relatados por (Silva *et al.*, 2023), que obtiveram rendimentos variando de 28,62 a 27,71 Mg ha⁻¹ sob condições de déficit hídrico de 24% e 50%, respectivamente, para a cultivar de sorgo forrageiro IPA SF-15 em ambientes semiáridos, uma cultivar especificamente desenvolvida para a produção de biomassa. De forma semelhante (Kirchner *et al.*, 2019) relatou um rendimento de massa seca de 27,02 Mg ha⁻¹ sob um déficit hídrico de 25% em relação à evapotranspiração de referência. Os valores inferiores registrados no presente estudo podem ser atribuídos às características genéticas da cultivar *BRS 506*, que se destina principalmente à produção de açúcar e etanol, e não de forragem, bem como a fatores externos, como infestações por ácaros no final do ciclo da cultura, particularmente na segunda safra. Esses fatores provavelmente contribuíram para a redução do rendimento. Portanto, o desenvolvimento e a implementação de estratégias de gestão eficiente da água que minimizem as perdas de rendimento são essenciais para sustentar a produção em condições de disponibilidade hídrica limitada.

As produtividades médias de massa seca em condições de déficit hídrico de 50%, 25% e 0% foram de 12,46, 13,97 e 14,79 Mg ha⁻¹, respectivamente. Esses valores são comparáveis aos relatados por (Silva *et al.*, 2011), que observaram produtividades totais de massa seca variando de 7,7 a 21,0 Mg ha⁻¹ em 25 híbridos de sorgo. De forma semelhante (Lira *et al.*, 2023) relatou valores de massa seca variando de 13,32 a 27,90 Mg ha⁻¹ ao avaliar diferentes cultivares de sorgo irrigadas com efluente de esgoto doméstico. As maiores produtividades nesse estudo foram atribuídas à composição rica em nutrientes do efluente, que promoveu o crescimento das plantas e o acúmulo de biomassa.

A exposição a um déficit hídrico de 50% resultou em reduções de 20,09% e 23,18% na produção de colmo e caldo, respectivamente. Em contraste, não foram observadas diferenças significativas entre o déficit moderado de 25% e a condição sem déficit, o que é particularmente relevante, pois demonstra a capacidade da cultivar de manter a produtividade sob estresse hídrico moderado. As produtividades de colmo relatadas por (Oktem; Oktem, 2024) para interações genótipo-ano variaram de 9,65 a 20,10 Mg ha⁻¹, valores inferiores aos observados no presente estudo. Esses indicadores, especialmente relevantes para a produção de bioenergia, sugerem que, embora a cultura apresente resiliência a déficits moderados, a restrição hídrica ainda tem um impacto mensurável nos componentes de produtividade diretamente relacionados

à produção de energia, destacando a sensibilidade parcial do sorgo a estresses hídricos mais severos.

As diferenças entre os experimentos podem ser atribuídas às falhas de germinação observadas em 2022, que comprometeram todo o ciclo de desenvolvimento das plantas. Além disso, a infestação por pragas no final do ciclo pode ter contribuído para o desempenho agrônômico reduzido em 2022, juntamente com as condições climáticas específicas daquele ano.

5. CONCLUSÃO

A cultivar de sorgo *BRS 506* demonstrou tolerância fisiológica à salinidade, mantendo a estabilidade da membrana celular mesmo sob níveis elevados de salinidade. Embora a maior salinidade tenha afetado o estado hídrico da planta, não comprometeu a produtividade de biomassa. Os resultados confirmam que a *BRS 506* é tolerante a níveis de salinidade da água de irrigação de até $6,0 \text{ dS m}^{-1}$ e moderadamente sensível a um déficit hídrico de 50% em termos de variáveis relacionadas à produtividade. Entretanto, as perdas de produtividade observadas foram proporcionalmente inferiores à intensidade da restrição hídrica imposta, evidenciando a importância de estratégias de manejo voltadas à mitigação dos efeitos adversos.

Uma redução de 25% na disponibilidade de água resultou em uma redução de produtividade de apenas 6,64%, demonstrando o uso eficiente da água e o potencial para o cultivo sustentável de sorgo em regiões com recursos hídricos limitados.

A cultivar *BRS 506* demonstrou resiliência sob déficit hídrico moderado e ao estresse salino, sem interação significativa entre os dois fatores, indicando que a irrigação deficitária com águas salobras pode ser uma estratégia eficiente para manutenção da produtividade da cultura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELAAL, K, A, A.; HAFEZ, Y, M.; EL-AFRY, M, M.; TANTAWY, D, S.; ALSHAAL, T, Effect of some osmoregulators on photosynthesis, lipid peroxidation, antioxidative capacity, and productivity of barley (*Hordeum vulgare* L.) under water deficit stress, **Environmental Science and Pollution Research**, v, 25, n, 30, p, 30199–30211, 2018,
- AHMAD DAR, R.; AHMAD DAR, E.; KAUR, A.; GUPTA PHUTELA, U, Sweet sorghum-a promising alternative feedstock for biofuel production, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v, 82, p, 4070–4090, 2018,
- ALLEN, R, G.; PEREIRA, L, S.; RAES, D.; SMITH, M, Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, **Roma: FAO**, v, 298, n, 0, 2006,
- ALVARES, C, A.; STAPE, J, L.; SENTELHAS, P, C.; DE MORAES GONÇALVES, J, L.; SPAROVEK, G, Köppen's climate classification map for Brazil, **Meteorologische Zeitschrift**, v, 22, n, 6, p, 711–728, 2013,
- ARNHOLD, E, easyanova: Analysis of Variance and Other Important Complementary Analyses, , 2024, Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=easyanova>, Acesso em: 7 abr, 2025,
- ASHRAF, M.; ALI, Q, Relative membrane permeability and activities of some antioxidant enzymes as the key determinants of salt tolerance in canola (*Brassica napus* L.), **Environmental and Experimental Botany**, v, 63, n, 1–3, p, 266–273, 2008,
- ASSEFA, Y.; STAGGENBORG, S, A.; PRASAD, V, P, V, Grain Sorghum Water Requirement and Responses to Drought Stress: A Review, **Crop Management**, v, 9, n, 1, p, 1–11, 2010,
- AYERS, R, S.; WESTCOT, D, W, A qualidade de água na agricultura, *In: ESTUDOS FAO, IRRIGAÇÃO E DRENAGEM* 29, REVISADO 1, 2, ed, Campina Grande: UFPB: [s, n.], 1999, (Estudos FAO, irrigação e Drenagem 29, revisado 1), p, 153,
- AYERS, R, S.; WESTCOT, D, W, **Water quality for agriculture**, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985, (FAO irrigation and drainage paper, v, 29, rev, 1),
- BARRS, H.; WEATHERLEY, P, A Re-Examination of the Relative Turgidity Technique for Estimating Water Deficits in Leaves, **Australian Journal of Biological Sciences**, v, 15, n, 3, p, 413, 1962,
- BHATTARAI, B.; SINGH, S.; WEST, C, P.; RITCHIE, G, L.; TROSTLE, C, L, Water Depletion Pattern and Water Use Efficiency of Forage Sorghum, Pearl millet, and Corn Under Water Limiting Condition, **Agricultural Water Management**, v, 238, p, 106206, 2020,
- BRAG, H, The Influence of Potassium on the Transpiration Rate and Stomatal Opening in *Triticum aestivum* and *Pisum sativum*, **Physiologia Plantarum**, v, 26, n, 2, p, 250–257, 1972,

CALONE, R.; SANOUBAR, R.; LAMBERTINI, C.; SPERANZA, M.; VITTORI ANTISARI, L.; VIANELLO, G.; BARBANTI, L, Salt Tolerance and Na Allocation in Sorghum bicolor under Variable Soil and Water Salinity, **Plants**, v, 9, n, 5, p, 561, 2020,

CONSECANA, **Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo**, 5, ed, Piracicaba: Consecana: [s, n,], 2006, (Manual de Instruções),

DJANAGUIRAMAN, M.; PRASAD, P, V, V.; CIAMPITTI, I, A.; TALWAR, H, S, Impacts of Abiotic Stresses on Sorghum Physiology, *In*: TONAPI, V, A.; TALWAR, H, S.; ARE, A, K.; BHAT, B, V.; REDDY, Ch, R.; DALTON, T, J, (org.), **Sorghum in the 21st Century: Food – Fodder – Feed – Fuel for a Rapidly Changing World**, Singapore: Springer, 2020, p, 157–188, Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8249-3_7, Acesso em: 1 out, 2024,

DUGAS, D, V.; MONACO, M, K.; OLSON, A.; KLEIN, R, R.; KUMARI, S.; WARE, D.; KLEIN, P, E, Functional annotation of the transcriptome of Sorghum bicolor in response to osmotic stress and abscisic acid, **BMC Genomics**, v, 12, n, 1, p, 514, 2011,

EL-TAYEB, M, A, Response of barley grains to the interactive effect of salinity and salicylic acid, **Plant Growth Regulation**, v, 45, n, 3, p, 215–224, 2005,

EMBRAPA, **BRS 506 o sorgo sacarino mais testado e plantado no Brasil**, : Embrapa Milho e Sorgo, 2012,

EMPARN, **Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-Relatório Pluviométrico**, , 2022, Disponível em: <https://meteorologia,emparn, rn, gov, br/relatorios/relatorios-pluviometricos>, Acesso em: 1 abr, 2025,

FERREIRA, E, B.; CAVALCANTI, P, P.; NOGUEIRA, D, A, ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs, **Applied Mathematics**, v, 05, n, 19, p, 2952–2958, 2014,

FRANCOIS, L, E.; DONOVAN, T.; MAAS, E, V, Salinity Effects on Seed Yield, Growth, and Germination of Grain Sorghum¹, **Agronomy Journal**, v, 76, n, 5, p, 741–744, 1984,

GAFF, D, F.; OLIVER, M, The evolution of desiccation tolerance in angiosperm plants: a rare yet common phenomenon, **Functional Plant Biology**, v, 40, n, 4, p, 315, 2013,

HADEBE, S, T.; MABHAUDHI, T.; MODI, A, T, Water Productivity of Selected Sorghum Genotypes Under Rainfed Conditions, **International Journal of Plant Production**, v, 14, n, 2, p, 259–272, 2020,

HASAN, M, K.; ISLAM, M, S.; ISLAM, M, R.; ISMAAN, H, N.; SABAGH, A, E.; BARUTÇULAR, C.; MEENA, R, S.; SANEOKA, H, Water Relations and Dry Matter Accumulation of Black Gram and Mungbean as Affected by Salinity, **Thai Journal of Agricultural Science**, v, 52, n, 1, p, 54–67-54–67, 2019,

HNILIČKOVÁ, H.; HNILIČKA, F.; ORSÁK, M.; HEJNÁK, V, Effect of salt stress on growth, electrolyte leakage, Na⁺ and K⁺ content in selected plant species, **Plant, Soil and Environment**, v, 65, n, 2, p, 90–96, 2019,

HUANG, R, Research progress on plant tolerance to soil salinity and alkalinity in sorghum, **Journal of Integrative Agriculture**, v, 17, n, 4, p, 739–746, 2018,

IMPA, S, M.; PERUMAL, R.; BEAN, S, R.; JOHN SUNOJ, V, S.; JAGADISH, S, V, K, Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum, **Journal of Cereal Science**, v, 86, p, 124–131, 2019,

ISLAM, M, S.; HASAN, Md, K.; ISLAM, Md, R.; CHOWDHURY, Md, K.; PRAMANIK, M, H.; IQBAL, M, A.; RAJENDRAN, K.; IQBAL, R.; SOUFAN, W.; KAMRAN, M.; LIYUN, L.; EL SABAGH, A, Water relations and yield characteristics of mungbean as influenced by foliar application of gibberellic acid (GA3), **Frontiers in Ecology and Evolution**, v, 11, p, 1048768, 2023,

ISLAM, R, M.; HOSSAIN, M, F.; HOSSAIN, J.; GOLAM AZAM, M.; MASUMA AKHTER, M.; KAMRUL HASAN, M.; AL-ASHKAR, I.; F, ALMUTAIRI, K.; EL SABAGH, A.; ATIKUR RAHMAN, M.; AAMIR IQBAL, M.; SOHIDUL ISLAM, M, Drought Tolerance in Mung Bean is Associated with the Genotypic Divergence, Regulation of Proline, Photosynthetic Pigment and Water Relation, **Phyton**, v, 92, n, 3, p, 955–981, 2023,

ISLAM, M, R.; KAMAL, Mohd, M.; ALAM, M, A.; HOSSAIN, J.; SOUFAN, W.; SKALICKY, M.; BRESTIC, M.; HABIB-UR-RAHMAN, M.; EL SABAGH, A.; ISLAM, M, S, Physiochemical Changes of Mung Bean [*Vigna radiata* (L.) R, Wilczek] in Responses to Varying Irrigation Regimes, **Horticulturae**, v, 7, n, 12, p, 565, 2021,

KIRCHNER, J, H.; ROBAINA, A, D.; PEITER, M, X.; TORRES, R, R.; MEZZOMO, W.; BEN, L, H, B.; PIMENTA, B, D.; PEREIRA, A, C, Funções de produção e eficiência no uso da água em sorgo forrageiro irrigado, **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v, 14, n, 2, p, 1–9, 2019,

LIRA, R, B.; FERREIRA-NETO, M.; DA SILVA DIAS, N.; DE MEDEIROS, J, F.; DE BRITO, R, F.; DE LEMOS, M.; DOS SANTOS FERNANDES, C.; DA SILVA SÁ, F, V, Biomass, grain yield, ethanol production, and energy cogeneration of sweet sorghum irrigated with domestic sewage effluent, **Biomass Conversion and Biorefinery**, v, 13, n, 10, p, 9131–9140, 2023,

MACÊDO, A, J, da S.; RAMOS, J, P, de F.; SANTOS, E, M.; SOUSA, W, H, de; OLIVEIRA, F, G, de; SOUZA, J, T, A.; ORESCA, D, Morphometric and productive characteristics of sorghum genotypes for forage production in the Brazilian semi-arid, **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v, 19, p, 256–267, 2018,

MAHLOOJI, M.; SEYED SHARIFI, R.; RAZMJOO, J.; SABZALIAN, M, R.; SEDGHI, M, Effect of salt stress on photosynthesis and physiological parameters of three contrasting barley genotypes, **Photosynthetica**, v, 56, n, 2, p, 549–556, 2018,

MANSOUR, M, M, F.; EMAM, M, M.; SALAMA, K, H, A.; MORSY, A, A, Sorghum under saline conditions: responses, tolerance mechanisms, and management strategies, **Planta**, v, 254, n, 2, p, 24, 2021,

MANSOUR, M, M, F.; SALAMA, K, H, A, Cellular basis of salinity tolerance in plants, **Environmental and Experimental Botany**, v, 52, n, 2, p, 113–122, 2004,

MARTÍNEZ, J, P.; SILVA, H.; LEDENT, J, F.; PINTO, M, Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.), **European Journal of Agronomy**, v, 26, n, 1, p, 30–38, 2007,

MARTINS, A, de M.; FIGUEIREDO-JÚNIOR, J, M, M, de; LEMOS, R, do C.; GUERRA, W, D.; FREITAS, F, S, de; PARRELLA, R, A, da C.; SIMEONE, M, L, F.; SANTOS, A, S, dos, Characterization of sweet sorghum genotypes regarding adaptability and stability for biofuel production, **Ciência e Agrotecnologia**, v, 49, p, e020524, 2025,

MOHAMMADI ALAGOZ, S.; HADI, H.; TOORCHI, M.; PAWŁOWSKI, T, A.; ASGARI LAJAYER, B.; PRICE, G, W.; FAROOQ, M.; ASTATKIE, T, Morpho-physiological responses and growth indices of triticale to drought and salt stresses, **Scientific Reports**, v, 13, n, 1, p, 8896, 2023,

MUHAMMAD, M.; WAHEED, A.; WAHAB, A.; MAJEED, M.; NAZIM, M.; LIU, Y,-H.; LI, L.; LI, W,-J, Soil salinity and drought tolerance: An evaluation of plant growth, productivity, microbial diversity, and amelioration strategies, **Plant Stress**, v, 11, p, 100319, 2024,

NAZLI, R, I.; ASLANKACIRAN, C.; YANG, D.; LIAQAT, W.; POLAT, M.; CAVDAR, A, S.; TANSI, V.; BALOCH, F, S, Assessment of Sweet Sorghum Genotypes for Bioethanol Production Potential and Bagasse Combustion Characteristics in a Semi-Arid Mediterranean Climate, **Agronomy**, v, 14, n, 11, p, 2626, 2024,

OKTEM, A.; OKTEM, A, G, Bioethanol obtained from soluble sugars in sweet sorghum, influencing properties and their interrelationships, **Industrial Crops and Products**, v, 221, p, 119351, 2024,

PUNIA, H.; TOKAS, J.; BHADU, S.; MOHANTY, A, K.; RAWAT, P.; MALIK, A.; SATPAL, Proteome dynamics and transcriptome profiling in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under salt stress, **3 Biotech**, v, 10, n, 9, p, 412, 2020,

QUEIROZ, G, C, M.; DE MEDEIROS, J, F.; DA SILVA, R, R.; DA SILVA MORAIS, F, M.; DE SOUSA, L, V.; DE SOUZA, M, V, P.; DA NÓBREGA SANTOS, E.; FERREIRA, F, N.; DA SILVA, J, M, C.; CLEMENTE, M, I, B.; DE CASTRO GRANJEIRO, J, C.; DE ARAÚJO SALES, M, N.; CONSTANTE, D, C.; NOBRE, R, G.; DA SILVA SÁ, F, V, Growth, Solute Accumulation, and Ion Distribution in Sweet Sorghum under Salt and Drought Stresses in a Brazilian Potiguar Semiarid Area, **Agriculture**, v, 13, n, 4, p, 803, 2023,

RASTOGI, A.; KOVAR, M.; HE, X.; ZIVCAK, M.; KATARIA, S.; KALAJI, H, M.; SKALICKY, M.; IBRAHIMOVA, U, F.; HUSSAIN, S.; MBARKI, S.; BRESTIC, M, JIP-test as a tool to identify salinity tolerance in sweet sorghum genotypes, **Photosynthetica**, v, 58, n, SPECIAL ISSUE, p, 518–528, 2020,

ROSOLEM, C, A.; MALAVOLTA, E, Exigências nutricionais do sorgo sacarino, **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v, 38, p, 257–268, 1981,

ROY, R, C.; SAGAR, A.; TAJKIA, J, E.; RAZZAK, M, A.; HOSSAIN, A, Z, Effect of salt stress on growth of sorghum germplasms at vegetative stage, **Journal of the Bangladesh Agricultural University**, v, 16, n, 1, p, 67–72, 2018,

SANEOKA, H.; NAGASAKA, C.; HAHN, D, T.; YANG, W,-J.; PREMACHANDRA, G, S.; JOLY, R, J.; RHODES, D, Salt Tolerance of Glycinebetaine-Deficient and -Containing Maize Lines, **Plant Physiology**, v, 107, n, 2, p, 631–638, 1995,

SCOTTI CAMPOS, P.; PHAMTHI, A.; SEMEDO, J.; PAIS, I.; RAMALHO, J.; MATOS, M, Physiological responses and membrane integrity in three Vigna genotypes with contrasting drought tolerance, **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v, 25, n, 12, p, 1002, 2013,

SELEIMAN, M, F.; AL-SUHAIBANI, N.; ALI, N.; AKMAL, M.; ALOTAIBI, M.; REFAY, Y.; DINDAROGLU, T.; ABDUL-WAJID, H, H.; BATTAGLIA, M, L, Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects, **Plants**, v, 10, n, 2, p, 259, 2021,

SHALABY, O, A, Moringa leaf extract increases tolerance to salt stress, promotes growth, increases yield, and reduces nitrate concentration in lettuce plants, **Scientia Horticulturae**, v, 325, p, 112654, 2024,

SHALABY, O, A.; RAMADAN, M, E,-S, Mycorrhizal colonization and calcium spraying modulate physiological and antioxidant responses to improve pepper growth and yield under salinity stress, **Rhizosphere**, v, 29, p, 100852, 2024,

SILVA, R, R.; DE MEDEIROS, J, F.; DE QUEIROZ, G, C.; DE SOUSA, L, V.; DE SOUZA, M, V, P.; DE ALMEIDA BASTOS DO NASCIMENTO, M.; DA SILVA MORAIS, F, M.; DA NÓBREGA, R, F.; SILVA, L, M, E.; FERREIRA, F, N.; CLEMENTE, M, I, B.; CORDEIRO, C, J, X.; DE CASTRO GRANJEIRO, J, C.; CONSTANTE, D, C.; DA SILVA SÁ, F, V, Ionic Response and Sorghum Production under Water and Saline Stress in a Semi-Arid Environment, **Agriculture**, v, 13, n, 6, p, 1127, 2023,

SILVA JÚNIOR, L, G, A, S.; GHEYI, H, R.; MEDEIROS, J, F, de, COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÁGUAS DO CRISTALINO DO NORDESTE BRASILEIRO, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v, 3, p, 11–17, 1999,

SILVA, T, C.; SANTOS, E, M.; AZEVEDO, J, A, G.; EDVAN, R, L.; PERAZZO, A, F.; PINHO, R, M, A.; RODRIGUES, J, A, S.; SILVA, D, S, da, Agronomic divergence of sorghum hybrids for silage yield in the semiarid region of Paraíba, **Revista Brasileira de Zootecnia**, v, 40, p, 1886–1893, 2011,

SOUZA, L, V, D.; DA SILVA, R, R.; PIRES DE SOUZA, M, V.; CARVALHO MAIA DE QUEIROZ, G.; BATISTA CLEMENTE, M, I.; DE MEDEIROS, J, F, Effects of saline and water stress on sweet sorghum, **DYNA**, v, 91, n, 231, p, 69–75, 2024,

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I, M.; MURPHY, A, **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**, 6, ed. : Artmed Editora, 2017,

TANJI, K, K.; KIELEN, N, C, **Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas**, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002, (FAO irrigation and drainage paper, v, 61),

TEAM, R, C, R: A Language and Environment for Statistical Computing_, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2024, Disponível em: <https://www.r-project.org/>, Acesso em: 7 abr, 2025,

WANG, X.; YANG, J.; LIU, G.; YAO, R.; YU, S, Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution, **Agricultural Water Management**, v, 149, p, 44–54, 2015,

YANG, Y.; GUO, Y, Unraveling salt stress signaling in plants, **Journal of Integrative Plant Biology**, v, 60, n, 9, p, 796–804, 2018,

YUAN, C.; FENG, S.; HUO, Z.; JI, Q, Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China, **Agricultural Water Management**, v, 212, p, 424–432, 2019,

CAPITULO III- CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO MOPECO PARA O CULTIVO DO SORGO SOB CONDIÇÕES DE DÉFICIT HÍDRICO E SALINIDADE PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A busca por ferramentas que permitam maior eficiência no planejamento da irrigação, visando maximizar a produção com menor consumo de água, tem sido intensificada, sendo o MOPECO uma alternativa promissora para esse propósito. Com isso o objetivo do trabalho foi calibrar e validar o modelo MOPECO para a cultura do sorgo BRS 506 nas condições de irrigação deficitárias e salinidade, no semiárido brasileiro. Os dados para calibração foram resultado da pesquisa conduzidas em 2021 e 2022 no sítio Cumaru, localizado no município de Upanema, no Rio Grande do Norte, Brasil, na qual foi utilizado o delineamento experimental em blocos casualizados, em arranjo fatorial 3×3 e quatro repetições. Os tratamentos consistiram em três níveis de salinidade da água de irrigação (1,50, 3,75 e 6,00 dS m⁻¹) e três déficits hídricos de D0, D50 e D25 %ETc. A coleta de dados climáticos, produtividade da cultura, estádios fenológicos, déficit hídricos, coeficientes da cultura (Kc), coeficiente de resposta ao déficit hídrico da cultura (Ky), calendário de irrigação, evapotranspiração de referência (ETo) e graus dia diário (GDD) foram coletados nos dois ciclos. As informações coletadas foram usadas para calibração. Após calibrar com o ano de 2022, o programa MOPECO foi validado usando os dados de 2021. Os valores de Ky calibrados foram: 0,10, 0,30, 0,30 e 0,10 e os Kc 0,42; 0,42-1,12; 1,12 e 1,05. O rendimento observado e simulado ficou dentro dos níveis de tolerância exigida para a calibração do modelo MOPECO. O MOPECO é uma ferramenta válida para simular o rendimento vs os déficits hídricos aplicados para o sorgo até uma condição de salinidade de 3,75 dSm⁻¹, apresentando um ajuste perfeito com os resultados de Yo observado. O ajuste do modelo MOPECO para a salinidade de 6,0 dS m⁻¹, associado aos déficits hídricos D25 e D50, apresentou resultados promissores, demonstrando excelente desempenho. No entanto o modelo mostra uma deficiência para condições de alta salinidade sem déficit hídrico S3D0, necessitando de melhoria para incorporar junto ao modelo correções para melhorar as simulações nestas condições.

PALAVRAS CHAVES: Manejo de irrigação, estresse salino, BRS 506, Relação ETa/ETm

CHAPTER III – CALIBRATION AND VALIDATION OF THE MOPECO MODEL FOR SORGHUM CULTIVATION UNDER WATER DEFICIT AND SALINITY CONDITIONS IN THE BRAZILIAN SEMIARID REGION

ABSTRACT

The search for tools that enable greater efficiency in irrigation planning, aiming to maximize crop production with lower water consumption, has intensified, and the MOPECO model has emerged as a promising alternative for this purpose. Therefore, this study aimed to calibrate and validate the MOPECO model for sweet sorghum BRS 506 under deficit irrigation and saline conditions in the Brazilian semiarid region. The data used for calibration were obtained from experiments conducted in 2021 and 2022 at Cumarú Farm, located in the municipality of Upanema, Rio Grande do Norte, Brazil. The experimental design consisted of randomized blocks in a 3×3 factorial arrangement with four replications. Treatments included three irrigation water salinity levels (1.50, 3.75, and 6.00 dS m⁻¹) and three water deficit levels (D0, D25, and D50 %ETc). Climatic data, crop yield, phenological stages, water deficits, crop coefficients (Kc), crop response coefficients to water deficit (Ky), irrigation scheduling, reference evapotranspiration (ETo), and growing degree days (GDD) were collected during both growing cycles. These data were used for model calibration. After calibration using the 2022 data, the MOPECO model was validated with the 2021 dataset. The calibrated Ky values were 0.10, 0.30, 0.30, and 0.10, while the Kc values were 0.42, 0.42–1.12, 1.12, and 1.05. Observed and simulated yields remained within the tolerance limits required for MOPECO model calibration. The MOPECO model proved to be a valid tool for simulating yield under applied water deficits for sorghum up to a salinity level of 3.75 dS m⁻¹, showing excellent agreement with the observed yield (Yo) results. The adjustment of the MOPECO model for the salinity level of 6.0 dS m⁻¹ associated with water deficits D25 and D50 also showed promising results, demonstrating excellent performance. However, the model showed limitations under conditions of high salinity without water deficit (S3D0), indicating the need for improvements and incorporation of correction factors to enhance simulations under these conditions.

Keywords: Irrigation management, salt stress, BRS 506, ETa/ETm relation

1. INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor*) é uma importante cultura alimentar em muitos países, principalmente na África e na Ásia, é utilizado mundialmente na indústria de biocombustíveis e na pecuária (Impa *et al.*, 2019). No semiárido brasileiro, tem se destacado na produção de forragem com seu cultivo no período chuvoso e no período seco, sob irrigação, pela alta produtividade alcançada por volume de água gasto na irrigação das culturas (Barros *et al.*, 2020; Kirchner *et al.*, 2019).

Sendo uma cultura que se adapta bem as diferentes condições edafoclimáticas devido à sua rusticidade e capacidade de adaptação à escassez hídrica. Estudos têm mostrando a resposta adaptativa da cultura à seca e à salinidade, apresentando vantagens comparativas em comparação com outras culturas em termos de rendimento (Kaplan *et al.*, 2019; Queiroz *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2023).

Nesse sentido a busca por novas ferramentas e metodologia para maximizar o uso eficiente da água para a cultura faz se necessária. O Centro Regional de Estudios del Agua - CREA, na região semiárida de Castilla-La Mancha - Espanha, desenvolveu o modelo MOPECO (JUAN *et al.*, 1996; ORTEGA *et al.*, 2004) projetado para maximizar a rentabilidade das áreas irrigadas, situadas em zonas áridas e semiáridas com escassez de recursos hídricos, através do uso estratégico de irrigação deficitária controlada (DOMINGUEZ *et al.*, 2012), considerando uma superfície irrigada disponível (LOPEZ-MATA *et al.*, 2010). Na Espanha pesquisas vem sendo desenvolvidas utilizando o modelo MOPECO na calibração previamente para diversas culturas como cevada (Pardo *et al.*, 2020), milho (Domínguez *et al.*, 2012a, 2022), cebola (Domínguez *et al.*, 2012c), alho (Domínguez *et al.*, 2013; Cortés *et al.*, 2003), melão (Leite *et al.*, 2015) e batata (Martínez-Romero *et al.*, 2019). Sendo necessário a calibração do modelo para cultura do sorgo para um melhor planejamento e otimização da irrigação.

Tem sido calibrado diferentes culturas usando o modelo MOPECO que apresentava a principal limitação a ausência de um modulo de salinidade que impedia de realizar simulação com água salina usada na irrigação. No entanto (Domínguez *et al.*, 2011) propôs a criação do Modelo MOPECO - Sal para ser usado na simulação de água de baixa salinidade, criando um modulo que permite indicar estratégia de irrigação. No entanto recomenda atenção na utilização em condições de alta salinidade. Portanto a eficácia no planejamento da irrigação é essencial a calibração para a cultura desejada. Com isso, o objetivo do trabalho foi calibrar e validar o modelo MOPECO para a cultura do sorgo BRS 506 sob condições de irrigação deficitárias com

águas salobras, buscando encontrar opções de manejo de irrigações mais eficientes nas condições do semiárido brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As pesquisas foram conduzidas em 2021 e 2022 no sítio Cumaru, localizado no município de Upanema, no Rio Grande do Norte, Brasil, (Latitude 5° 33' 30" S, Longitude 37° 11' 56" O, e altitude de 110 m). O experimento foi conduzido usando a cultivar de sorgo BRS 506 que foi semeada nas datas (08 e 19 de setembro, respectivamente) usando uma plantadeira manual, colocando 20 sementes por metro linear. O desbaste foi realizado 15 dias após o plantio deixando 10 plantas por metro linear, no espaçamento em fileiras duplas 1,35 x 0,25 x 0,10 m.

O clima segundo a classificação de Köppen é BSh, ou seja, quente e seco (Alvares et al., 2013), com precipitação anual de 633 mm nos últimos 30 anos, concentrada nos meses de fevereiro a maio e temperatura média anual de 26°C (EMPARN, 2022). Durante os experimentos os dados climáticos foram coletados numa estação meteorologia instalada ao lado da área experimental.

O solo da área é classificado como Cambissolo Háplico, com profundidade média do solo é de 0,6 m, sendo classificado como textura franco arenosa (78,0% areia, 6,0% silte e 16,0% argila respectivamente). O é básico ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 7,35) teor de matéria orgânica (6,9 g kg⁻¹) teor de cálcio, magnésio e sódio (4,95, 1,55 e 0,37 cmol_c dm⁻³ respectivamente) potássio e fósforo (0,45 e 11,55 mg dm⁻³ respectivamente) e condutividade elétrica do extrato de saturação do solo de (0,85 dSm⁻¹). A densidade do solo, teor de água na capacidade de campo e o ponto de murcha permanente são 1,62g cm⁻³, 0,20 e 0,08 cm³cm⁻³ respectivamente.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 3 x 3, com quatro repetições: três níveis de salinidades da água de irrigação (1,50, 3,75 e 6,00 dS m⁻¹) e três déficit hídrico de irrigação (D0, D25 e D50 %ET_c estimada para a cultura), constituindo-se em 9 tratamentos, totalizando 36 parcelas experimentais. As unidades experimentais foram constituídas de duas fileiras duplas de 7,0 metros, sendo a área útil as duas fileiras internas, eliminando-se 1,5 m das extremidades.

A água com menor nível de salinidade (1,5 dS m⁻¹) era oriunda do poço tubular e a água de maior salinidade (6,0 dS m⁻¹) foi definida com base na tolerância à salinidade da cultura do sorgo para rendimento de 60% do seu potencial produtivo (Ayers; Westcot, 1999). Para obtenção dos dois maiores níveis de salinidade, foram preparadas soluções estoque na

concentração de 200 g L^{-1} de NaCl ($3,42 \text{ mol L}^{-1}$), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($1,36 \text{ mol L}^{-1}$) e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($0,81 \text{ mol L}^{-1}$) e adicionadas quantidades da solução estoque de modo que a proporção final fosse de 6,3:2,7:1 de Na, Ca e Mg, o que representa a composição média das águas da região que explora o Aquífero Calcário Jandaíra (Silva Júnior; Gheyi; Medeiros, 1999). Os níveis de salinidade foram monitorados diariamente, com auxílio de condutivímetro portátil.

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento com vazão de $1,65 \text{ L h}^{-1}$ a 100 kPa de pressão de trabalho e coeficiente de uniformidade de distribuição de 95% com espaçamentos de 1,6 m entre linhas e emissores de 0,20 e 0,30 m para fornecer vazões por metro linear proporcional às lâminas requeridas. As lâminas de irrigação foram estimadas pelo percentual da evapotranspiração da cultura (ET_c) através do cálculo da evapotranspiração de referência diária (ET_0), pelo método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006) e o coeficiente da cultura (K_c) diário determinado pelo método do K_c dual. A ET_0 foi estimada a partir de dados coletados em uma estação meteorológica localizada próxima ao experimento. As lâminas totais de água aplicada durante todo o ciclo foram 279, 393, 498 mm e 299, 409, 520 mm para os períodos de 2021 e 2022, respectivamente, sendo no primeiro ciclo aplicado 44,2 mm nos primeiros 9 dias igualmente para todos os tratamentos, e em 2022, 77,2 mm até o 12º dia.

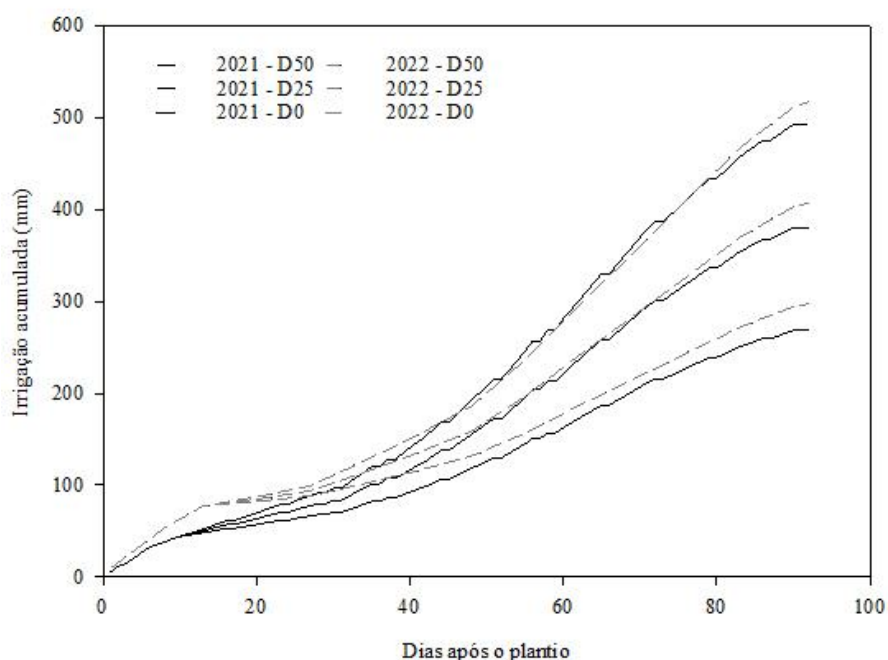


Figura 1. Irrigação acumulada para os tratamentos durante os experimentos de 2021 e 2022.

2.1 Apresentação do modelo

MOPECO utiliza o modelo proposto por (Stewart *et al.*, 1977) para estimar a produtividade da cultura em função da razão ET_a/ET_m nos diferentes estágios de crescimento. Quando $ET_a < ET_m$, a planta sofre com qualquer estresse que possa causar queda na produtividade (produtividade real (Y_a) < produtividade potencial (Y_m)).

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{j=1}^{n=4} \left(1 - k_{yj} \left(1 - \frac{ET_{aj}}{ET_{mj}} \right) \right)$$

Em que, Y_a e Y_m são os rendimentos reais e potenciais das culturas (kg ha^{-1}); n é o número de estágios de crescimento (Allen *et al.*, 1998); j é o estágio de crescimento real; k_y é o fator de resposta do rendimento da cultura; enquanto ET_a e ET_m são a evapotranspiração sazonal da cultura (mm) produzindo Y_a e Y_m , respectivamente.

A ET_m diária é calculada usando a equação proposta por (Doorenbos; Pruitt, 1977), que requer valores para K_c em cada estágio de crescimento e evapotranspiração de referência diária (ET_o , em mm (Allen *et al.*, 1998)).

$$ET_m = K_c ET_o$$

Em que, p_{cor} é p modificado devido a condições salinas (mm); TAW_{salt} é TAW modificado devido a condições salinas (mm); ϑ_{FC} é o conteúdo de água do solo na capacidade de campo (mm mm^{-1}); Z_r é a profundidade da raiz (mm); enquanto $\vartheta_{WP_{salt}}$ é o conteúdo de água do solo no ponto de murcha para condições salinas (mm mm^{-1}), que pode ser estimado da seguinte forma:

$$p_{cor} = p - \frac{b}{100} (EC_e - EC_{et}) p$$

$$\vartheta_{WP_{salt}} = \vartheta_{WP} + b \left(\frac{EC_e - EC_{et}}{100} \right) (\vartheta_{FC} - \vartheta_{WP})$$

$$TAW_{salt} = (\vartheta_{FC} - \vartheta_{WP_{salt}}) Z_r$$

Neste estudo, o déficit hídrico e as condições de salinidades foram considerados fatores causadores de estresse, correspondendo à evapotranspiração real sob condições de estresse hídrico (ET_{aw}), condições de salinidade (ET_{as}) ou ambas as condições de estresse (ET_{aws}).

$$\frac{ET_{aws}}{ET_m} = K_{sc} = K_{ss} K_{sw} = \left[1 - \frac{b}{k_{y100}} (EC_e - EC_{et}) \right] \frac{TAW_{salt} - Dr}{(1 - p) TAW_{salt}}$$

Em que, ET_{aws} é ET_a sob estresse hídrico e condições salinas (mm); K_{sc} é um fator de redução da transpiração adimensional dependente de K_{sw} e K_{ss} ; K_{ss} é um fator de redução da transpiração adimensional dependente da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo [0–1], onde $K_{ss} = 1$ se $EC_e \leq EC_{et}$; K_{sw} é um fator de redução da transpiração adimensional

dependente da água disponível no solo $[0-1]$, onde $K_{sw} = 1$ se $Dr \leq (1 - p)TAW$; EC_e é a condutividade elétrica real do extrato de saturação do solo, como o valor médio da zona da raiz ($dS\ m^{-1}$); EC_{et} é o limite de condutividade elétrica do extrato de saturação do solo acima do qual o rendimento da cultura é afetado pela salinidade ($dS\ m^{-1}$); b é um parâmetro específico da cultura, que descreve a taxa de diminuição do rendimento por unidade de excesso de sais ($\% dS^{-1}\ m$). Os valores gerais de EC_{et} estão incluídos em (Doorenbos; Pruitt, 1977).

2.2 Calibração e validação da relação rendimentos versus déficit hídricos e salinidades.

Estabelecer o valor de Y_m de acordo com os resultados dos ensaios de campos.

Obter as relações ET_a/ET_m de cada etapa de K_y em cada um dos 18 tratamentos (9 tratamentos por anos) durante os anos de 2021 e 2022.

Calibrar os valores de K_y (Doorenbos; Kassan, 1979) para encontrar o melhor ajuste entre os rendimentos observados e os simulados nos ensaios de 2021 e 2022.

Validar os valores atribuídos a cada parâmetros mediante a simulação dos calendários de irrigação de 2021 e 2022 e comparar com os rendimentos observados com os simulados.

A relação “Rendimentos vs déficit hídricos e salinidades” se considera calibrada quando a diferença entre os rendimentos observados e simulados é igual ou menor que 10%, e quando a porcentagem de rendimentos simulados atende aos requisitos anteriores é igual ou maior a 70% (Domínguez *et al.*, 2012a, 2012c; Farahani; Izzi; Oweis, 2009; Heng *et al.*, 2009, 2009).

Para verificação da qualidade do ajuste do modelo os parâmetros estatísticos erro quadrático médio (RMSE), erro do quadrático médio normalizado (NRMSE) e taxa de similaridade (SR) (Willmott, 1982) foram aplicados.

$$RMSE = \left[n^{-1} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right]^{1/2}$$

Em que, RMSE é a raiz do erro quadrático médio; n é o número de observações; S_i e O_i são os valores simulados e observados, respectivamente.

$$RMSE = 100 \left(\frac{RMSE}{O_{AV}} \right)$$

Em que, RMSE é o erro do quadrático médio normalizado, estimado como uma porcentagem do valor médio da variável; O_{av} é o valor médio da variável observada.

$$SR = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{AV})^2}$$

Em que, SR é a Taxa de Similaridade expressa como uma medida relativa da diferença entre variáveis (se $SR = 1$, há concordância perfeita entre S e O).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados da pesquisa são apresentados onde os valores de Kc (Figura 2) são próximos aos propostos por (Pereira *et al.*, 2025) durante a etapa Kc (III) e ligeiramente superior a etapa final Kc (IV) de 1,05 frente a 0,95. Os coeficientes são parecidos aos estabelecidos por (Piccinni *et al.*, 2009) no Texas com valores de 0,3 Kc (I), 1,10 (Kc (III) e para o Kc final o resultado foi bem distinto de 0,55 frente ao valor encontrado de 0,95. Por outro lado (Lima *et al.*, 2021) encontrou valores de Kc de 0,40, 0,68, 1,14 e 1,10 para as fases I, II, III e IV em uma investigação realizada em Apodi com a cultivar de sorgo BRS Ponta Negra.

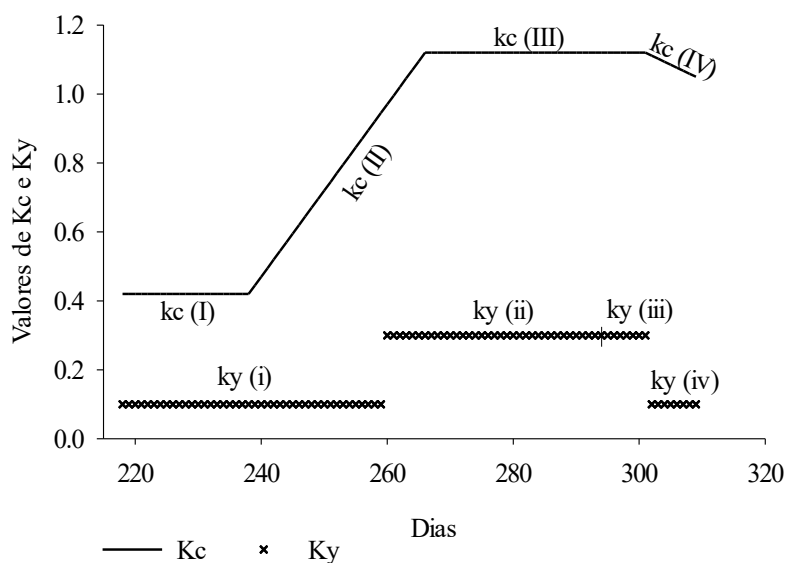


Figura 2. Evolução do coeficiente de cultura (Kc) e coeficiente de sensibilidade ao estresse hídrico da planta (Ky) ao longo do ciclo da cultura.

A salinidade do solo simulada através do modelo MOPECO para uma profundidade de 0,4m apresentaram valores de condutividade elétrica do estrato de saturação (Tabela 1) de 2,35 dSm^{-1} (S1D50) a 3,64 dSm^{-1} (S1D0) para ano de 2021 e 2,25 dSm^{-1} (S1D50) a 3,49 dSm^{-1} (S1D0) para o ano de 2022 nas condições de salinidade baixa de 1,50 $dS m^{-1}$. Essa salinidade foi evoluindo com aumento da salinidade da água de irrigação que em 3,75 dSm^{-1} apresentaram valores de 4,34 dSm^{-1} (S2D50) a 7,60 dSm^{-1} (S2D0) para ano de 2021 e 4,11 dSm^{-1} (S2D50) a

7,22 dSm⁻¹ (S2D0) para o ano de 2022. Para a salinidade de 6,0 dSm⁻¹ os valores simulados pelo modelo foram de 6,39 dSm⁻¹ (S3D50) a 10,76 dSm⁻¹ (S3D0) para ano de 2021 e 5,98 dSm⁻¹ (S3D50) a 10,12 dSm⁻¹ (S3D0) para o ano de 2022. Esses valores simulados quando verificamos os valores reais da salinidade do solo medida ao final do experimento superestima os valores reais da CEes do solo para as diferentes condições de salinidade (Tabela 1).

Quando foi submetido a salinidade de 6,0 dS m⁻¹ o modelo não funcionou corretamente apresentando dados divergentes com os dados reais. O MOPECO foi desenvolvido para planejar estratégias para a otimização do uso da água de irrigação (Ortega Álvarez *et al.*, 2004), mas apresenta uma limitação devido à ausência de um modulo de salinidade, para superar essa limitação foi desenvolvido um modulo de salinidade e adicionado no modelo criando o MOPECO-Sal (Domínguez *et al.*, 2011). No entanto ainda requer melhoria principalmente nas simulações com água salina, como foi identificado em nossas simulações.

Tabela 1. Valores da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo real e estimada pelo modelo MOPECO ao longo do período de experimento de 2021 e 2022 para as diferentes condições de estresse salino.

Tratamentos	Real	Estimada	Real	Estimada
	2021		2022	
	CEes (dS m ⁻¹)			
S1D50	2,12	2,35	2,35	2,25
S1D25	1,67	3,01	1,61	2,87
S1D0	1,16	3,64	1,74	3,49
S2D50	5,68	4,34	5,54	4,11
S2D25	4,58	5,99	4,39	5,67
S2D0	2,65	7,6	3,77	7,22
S3D50	3,73	6,39	5,97	5,98
S3D25	3,71	6,19	4,97	8,46
S3D0	2,92	10,76	5,01	10,12

Utilizando o modulo de simulação do balanço da água com sais no solo e a evapotranspiração do modelo MOPECO com os dados climáticos registrados na estação meteorológica situada junto as parcelas dos experimentos e calculada as relações ETa/ETm em cada uma das etapas de Ky (Figura 3).

Os tratamentos onde a salinidade da água de irrigação é de 1,5 dSm⁻¹ (Figura 3A,4B) as relações ETa/ETm geral simularam os valores de 0,97, 0,78 e 0,57 próximos os estresses propostos para condições de estresse. Em nenhum dos anos, durante a primeira etapa de Ky o cultivo encontro sob condições de estresse (ETa/ETm=1), portanto não é possível realizar uma calibração correta do valor de Ky para este estádio. Isso ocorre devido as diferenciações de

tratamentos ter ocorrido após esta etapa e as baixas demandas nesta fase pela cultura. Os máximos estresses foram ocorridos nas fases de Ky (III) e Ky (IV). As relações ET_a/ET_m simuladas para salinidade de $6,0 \text{ dSm}^{-1}$ com sem déficit hídrico D0 apresentou resultados negativos da relação o que significa que o modelo não funciona para essas condições.

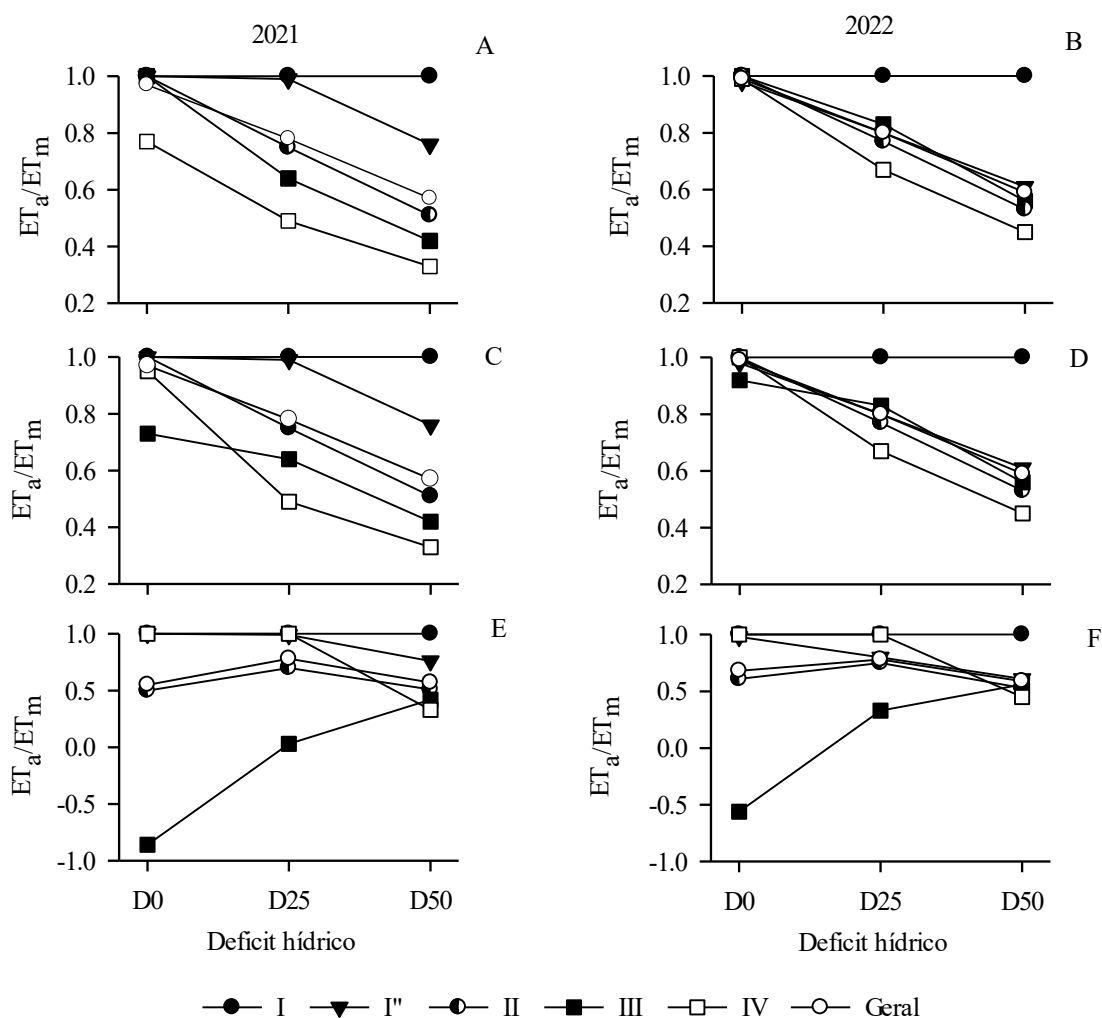


Figura 3. Relação ET_a/ET_m em cada etapa de Ky para as condições de salinidade S1 (A e B), S2 (C e D) e S3 (E e F) nos experimentos de 2021 e 2022 para as diferentes condições de déficit hídrico.

A combinação de valores de Ky que melhor se ajusta entre os rendimentos observados e os rendimentos simulados são apresentados Figura 4. Os dados utilizados para calibração em 2022 apresentaram 29 de 36 simulações apresentou uma diferença em rendimento igual ou inferior a 10% em comparação com os observados, que representa 80,6% de acerto por parte do modelo (Figura 4). Utilizando os mesmos valores de Ky para o ano de 2021 a porcentagem de valores simulados dentro de 10% foi de 77,8% o que valida o modelo, visto que essas porcentagens é superior aos 70% estabelecido por (Domínguez *et al.*, 2012b).

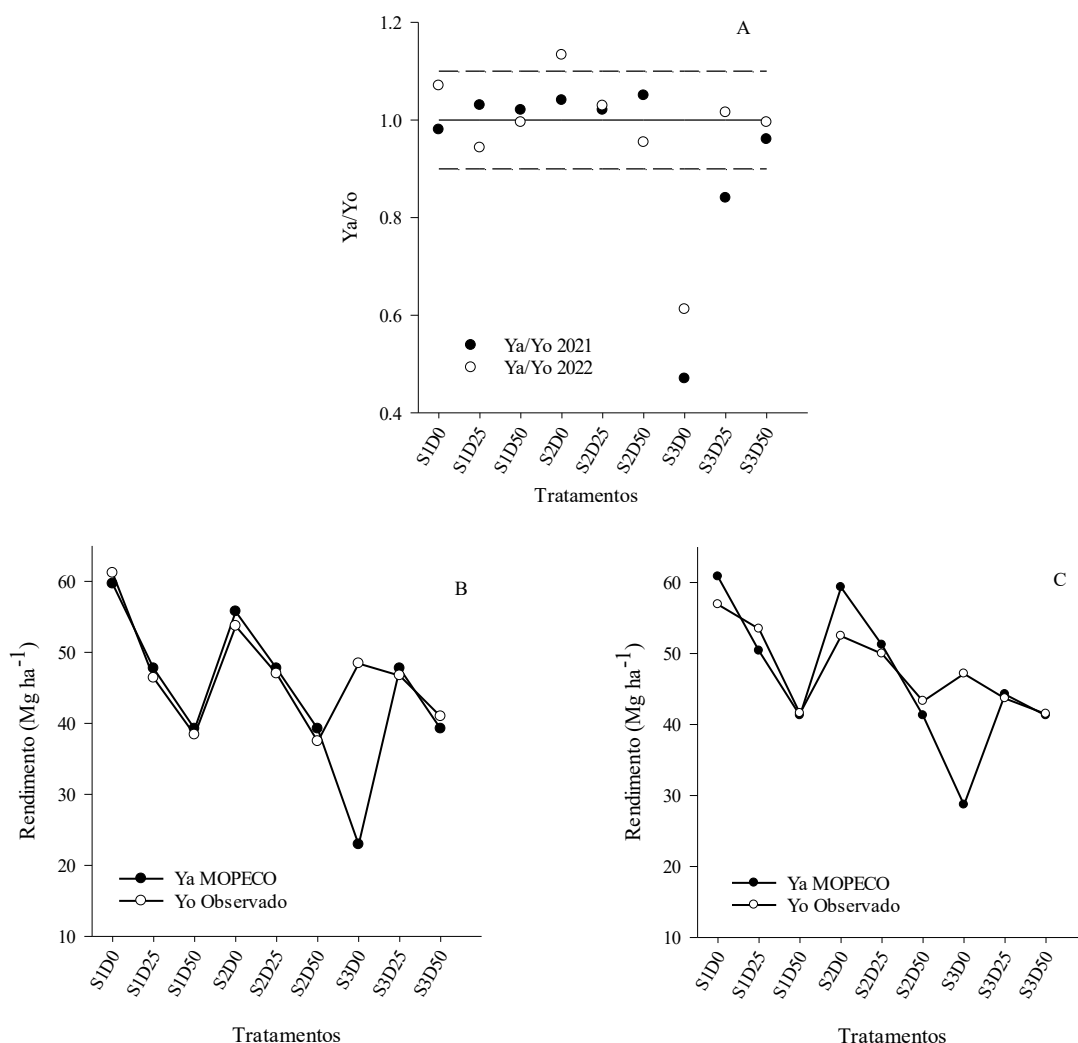


Figura 4. Relação do rendimento simulado verso o observado (Ya/Yo) (A), Rendimento observado 2021(B) e 2022 (C).

O impacto do déficit hídrico no rendimento sorgo depende da intensidade da etapa de crescimento que se encontra as plantas. Em nenhuma dos tratamentos houve déficit hídrico na etapa de Ky (I) por isso não se pode analisar a sensibilidade do cultivo durante essa etapa. Na literatura não foi encontrado estudos baseado na equação de (Stewart *et al.*, 1977) portanto não foi possível constatar resultados de Ky nas distintas etapas de desenvolvimento do cultivo ao longo do trabalho. Os déficits simulados nas relações $E_t/a/E_{tm}$ mostraram rendimentos simulados em comparação aos observados apresentando um bom ajuste para os tratamentos aplicados. Apenas para o tratamento de S3D0 o rendimento simulado foi discrepante do resultado observado em campo sendo observa para os dois períodos de cultivo. Este resultado apresentou esse comportamento devido ao modelo não do jeito que se encontra não é possível simular em condições de alta salinidade. Necessitando de ajuste no modelo para que possa realizar as simulações adequadas. Como o MOPECO utiliza um coeficiente Ky global para

simular a resposta produtiva sob condições de baixa salinidade, sua aplicação em cenários de elevada concentração salina tende a superestimar ou subestimar o rendimento. Dessa forma, torna-se necessária a incorporação de parâmetros específicos para estresse salino, permitindo maior robustez e confiabilidade nas simulações em ambientes com restrição hídrica associada à salinidade.

Segundo os valores de RMSE, NRMSE e SR (Tabela 2) foi obtido um bom ajuste entre os rendimentos observados e os simulados para os dois anos de experimentos, estando dentro dos limites estabelecidos para cada parâmetros estatísticos utilizados. Como consequência pode se considerar validado a calibração do MOPECO para o sorgo nas condições submetidas.

Tabela 2. Estatística para os dois anos de experimento.

Ano	RMSE	NRMSE (%)	SR
	(Mg ha ⁻¹)	(%)	
2021	9,53	20,27	0,91
2022	7,31	15,33	0,93

4 CONCLUSÕES

O MOPECO é uma ferramenta válida para simular o rendimento vs os déficits hídricos aplicados para o sorgo até uma condição de salinidade de 3,75 dSm⁻¹, apresentando um ajuste perfeito com os resultados de Y_o observado.

O ajuste do modelo MOPECO para a salinidade de 6,0 dS m⁻¹, associado aos déficits hídricos D25 e D50, apresentou resultados promissores, demonstrando excelente desempenho. No entanto o modelo mostra uma deficiência para condições de alta salinidade sem déficit hídrico S3D0, necessitando de melhoria para incorporar junto ao modelo correções para melhorar as simulações nestas condições. Novas pesquisas devem ser desenvolvidas para estudar a dinâmica da salinidade no solo para criação de um algoritmo para ser incorporado ao modelo MOPECO-Sal.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. (FAO irrigation and drainage paper, v. 56).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. **Roma: FAO**, v. 298, n. 0, 2006.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. A qualidade de água na agricultura. *In: ESTUDOS FAO, IRRIGAÇÃO E DRENAGEM 29, REVISADO 1*. 2. ed. Campina Grande: UFPB: [s. n.], 1999. (Estudos FAO, irrigação e Drenagem 29, revisado 1). p. 153.

BARROS, B. G. de F.; FREITAS, A. D. S. de; TABOSA, J. N.; LYRA, M. do C. C. P. de; MERGULHÃO, A. C. do E. S.; SILVA, A. F. da; OLIVEIRA, W. da S.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I.; SAMPAIO, E. V. de S. B. Biological nitrogen fixation in field-grown sorghum under different edaphoclimatic conditions is confirmed by N isotopic signatures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, n. 1, p. 93–101, 2020.

CORTÉS, C. F.; MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; LÓPEZ URREA, R. Production of garlic (*Allium sativum* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 2, p. 155–167, 2003.

DOMÍNGUEZ, A.; JIMÉNEZ, M.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; LEITE, K. N. Simulation of onion crop behavior under optimized regulated deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 113, p. 64–75, 2012a.

DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ, R. S.; DE JUAN, J. A.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; TARJUELO, J. M. Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 42–53, 2012b.

DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ, R. S.; DE JUAN, J. A.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; TARJUELO, J. M. Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 42–53, 2012c.

DOMÍNGUEZ, A.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; LEITE, K. N.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A.; LÓPEZ-URREA, R. Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic growing in central Spain. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 154–167, 2013.

DOMÍNGUEZ, A.; SCHWARTZ, R. C.; PARDO, J. J.; GUERRERO, B.; BELL, J. M.; COLAIZZI, P. D.; LOUIS BAUMHARDT, R. Center pivot irrigation capacity effects on maize yield and profitability in the Texas High Plains. **Agricultural Water Management**, v. 261, p. 107335, 2022.

DOMÍNGUEZ, A.; TARJUELO, J. M.; DE JUAN, J. A.; LÓPEZ-MATA, E.; BREIDY, J.; KARAM, F. Deficit irrigation under water stress and salinity conditions: The MOPECO-Salt Model. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 9, p. 1451–1461, 2011.

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield Responseto water. Irrigation and Drainage Paper Nº33.** Italy: [s. n.], 1979. (FAO, v. 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977. (FAO, v. 24).

EMPARN. **Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte-Relatório Pluviométrico.** , 2022. Disponível em: <https://meteorologia.emparn.rn.gov.br/relatorios/relatorios-pluviometricos>. Acesso em: 1 abr. 2025.

FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 469–476, 2009.

HENG, L. K.; HSIAO, T.; EVETT, S.; HOWELL, T.; STEDUTO, P. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 3, p. 488–498, 2009.

IMPA, S. M.; PERUMAL, R.; BEAN, S. R.; JOHN SUNOJ, V. S.; JAGADISH, S. V. K. Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum. **Journal of Cereal Science**, v. 86, p. 124–131, 2019.

KAPLAN, M.; KARA, K.; UNLUKARA, A.; KALE, H.; BUYUKKILIC BEYZI, S.; VAROL, I. S.; KIZILSIMSEK, M.; KAMALAK, A. Water deficit and nitrogen affects yield and feed value of sorghum sudangrass silage. **Agricultural Water Management**, v. 218, p. 30–36, 2019.

KIRCHNER, J. H.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; TORRES, R. R.; MEZZOMO, W.; BEN, L. H. B.; PIMENTA, B. D.; PEREIRA, A. C. Funções de produção e eficiência no uso da água em sorgo forrageiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 2, p. 1–9, 2019.

LEITE, K. N.; CABELLO, M. J.; VALNIR JÚNIOR, M.; TARJUELO, J. M.; DOMÍNGUEZ, A. Modelling sustainable salt water management under deficit irrigation conditions for melon in Spain and Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 95, n. 11, p. 2307–2318, 2015.

LIMA, J. G. A.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MEDEIROS, J. F. D.; VIANA, P. C.; MANIÇOBA, R. M. Water requirement and crop coefficients of sorghum in Apodi Plateau. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 10, p. 684–688, 2021.

MARTÍNEZ-ROMERO, A.; DOMÍNGUEZ, A.; LANDERAS, G. Regulated deficit irrigation strategies for different potato cultivars under continental Mediterranean-Atlantic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 164–176, 2019.

ORTEGA ÁLVAREZ, J. F.; DE JUAN VALERO, J. A.; TARJUELO MARTÍN-BENITO, J. M.; LÓPEZ MATA, E. MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. **Irrigation Science**, v. 23, n. 2, p. 61–75, 2004.

PARDO, J. J.; MARTÍNEZ-ROMERO, A.; LÉLLIS, B. C.; TARJUELO, J. M.; DOMÍNGUEZ, A. Effect of the optimized regulated deficit irrigation methodology on water

use in barley under semiarid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105925, 2020.

PEREIRA, L. S.; RICHARD G. ALLEN; PAULA PAREDES; LÓPEZ-URREA, R.; RAES, D.; SMITH, M.; AYSE KILIC; MAHER SALMAN. **Crop evapotranspiration**. : FAO, 2025. (, v. 56). Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd6621en>. Acesso em: 21 fev. 2026.

PICCINNI, G.; KO, J.; MAREK, T.; HOWELL, T. Determination of growth-stage-specific crop coefficients (KC) of maize and sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 12, p. 1698–1704, 2009.

QUEIROZ, G. C. M.; DE MEDEIROS, J. F.; DA SILVA, R. R.; DA SILVA MORAIS, F. M.; DE SOUSA, L. V.; DE SOUZA, M. V. P.; DA NÓBREGA SANTOS, E.; FERREIRA, F. N.; DA SILVA, J. M. C.; CLEMENTE, M. I. B.; DE CASTRO GRANJEIRO, J. C.; DE ARAÚJO SALES, M. N.; CONSTANTE, D. C.; NOBRE, R. G.; DA SILVA SÁ, F. V. Growth, Solute Accumulation, and Ion Distribution in Sweet Sorghum under Salt and Drought Stresses in a Brazilian Potiguar Semiarid Area. **Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 803, 2023.

SILVA, R. R.; DE MEDEIROS, J. F.; DE QUEIROZ, G. C.; DE SOUSA, L. V.; DE SOUZA, M. V. P.; DE ALMEIDA BASTOS DO NASCIMENTO, M.; DA SILVA MORAIS, F. M.; DA NÓBREGA, R. F.; SILVA, L. M. E.; FERREIRA, F. N.; CLEMENTE, M. I. B.; CORDEIRO, C. J. X.; DE CASTRO GRANJEIRO, J. C.; CONSTANTE, D. C.; DA SILVA SÁ, F. V. Ionic Response and Sorghum Production under Water and Saline Stress in a Semi-Arid Environment. **Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 1127, 2023.

SILVA JÚNIOR, L. G. A. S.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. de. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÁGUAS DO CRISTALINO DO NORDESTE BRASILEIRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, p. 11–17, 1999.

STEWART, J.; HAGAN, R.; PRUITT, W.; DANIELSON, R.; FRANKLIN, W.; HANKS, R.; RILEY, J.; JACKSON, E. **Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil**. , 1977.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309–1313, 1982.