



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

BALTAZAR CIRINO JÚNIOR

**ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA
NA CULTURA DO SORGO: APLICAÇÃO DE LÂMINAS DEFICITÁRIA EM
DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS**

MOSSORÓ

2026

BALTAZAR CIRINO JÚNIOR

**ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA
NA CULTURA DO SORGO: APLICAÇÃO DE LÂMINAS DEFICITÁRIA EM
DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS**

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: Tecnologia em nutrição de plantas e soluções para a convivência com a seca e salinidade

Orientador: José Francismar de Medeiros,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2026

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

C578e Cirino Junior, Baltazar .
ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA NA
CULTURA DO SORGO: APLICAÇÃO DE LÂMINAS
DEFICITÁRIA EM DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS /
Baltazar Cirino Junior. - 2026.
113 f. : il.

Orientador: José Francismar de Medeiros.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2026.

1. Forragem. 2. ORDI. 3. Etanol. 4. Déficit
hídrico. I. Medeiros, José Francismar de, orient.
II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

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

**ESTRATÉGIA PARA OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA
NA CULTURA DO SORGO: APLICAÇÃO DE LÂMINAS DEFICITÁRIA EM
DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS**

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: Tecnologia em nutrição de plantas e soluções para a convivência com a seca e salinidade

Defendida em: 24/02/ 2026

BANCA EXAMINADORA

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

Glauber Henrique de Sousa Nunes, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

João Everthon da Silva Ribeiro, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Genival Barros Júnior, Prof. Dr. (UFRPE)
Membro Examinador

George do Nascimento Araújo Junior, Dr. (SENAI CIMATEC)
Membro Examinador

À minha mãe, Josefa Salvador (In Memoriam)

“De todo o amor que eu tenho

Metade foi tu que me deu

Salvando Minh ‘alma da vida

Sorrindo e fazendo o meu eu”.

*A você, que sempre me apoiou, confiou em
mim e foi meu sustento, dedico.*

*Aos meus pais, Baltazar e Josefa (In
memoriam), aos meus irmãos, José
Edson, Cristina, Erasmo, João
Paulo, Walter, Emanoel, Cristiane
e Ana Paula, e a minha esposa,
Cintya Mikaelly.
Sou eternamente grato a vocês.*

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por sua infinita misericórdia!

Agradeço aos meus pais, Baltazar Cirino e Josefa Salvador (*in memoriam*) pela criação, confiança, amor e por sempre acreditarem em mim. Aos meus irmãos, José Edson, Cristina, Erasmo, João Paulo, Walter, Emanuel, Cristiane e Ana Paula, pelo companheirismo e amizade. Agradeço pelo apoio de vocês, minha família.

Agradeço à minha esposa, Cintya Souza, por tudo o que tem feito por mim. Obrigado por ter acompanhado de perto a minha jornada durante o doutorado, por ter aceitado o desafio de cursá-lo em outro estado, em meio às adversidades. Obrigado por acreditar em mim quando nem eu mesmo acreditava e por estar ao meu lado durante toda a realização desta pesquisa.

Agradeço à UFRSA e ao PPGMSA pela estrutura e colaboração no desenvolvimento da minha pesquisa. Agradeço à CAPES pelo fornecimento da bolsa.

Agradeço ao meu orientador, Dr. José Francismar de Medeiros, pela orientação, ensinamentos e auxílio para a realização do meu trabalho.

Agradeço ao meu grupo de pesquisa “Manejo de Solo e Água na Agricultura Irrigada”, especialmente a Fagner, Mateus, Cherlyson, Rodrigo, Maik, Áleff, Marvigna e Dárcio, bem como aos colegas do PPGMSA, Humberto Freire, Antônio Sermilher, Kilton, Norlan Leonel, Paulo e Éder.

Agradeço aos técnicos, Gustavo, Sara e Antônio pelo auxílio nas análises.

Agradeço ao pessoal das fazendas Cumaru e Alagoinha, De Assis, Fernando, Valdinho, Cosmildo, Flabenio, Náldecio, Max e Sérgio, pela colaboração na execução do trabalho.

Agradeço a Genilson Fernandes, Thiago e Romário pela estadia nos primeiros dias em Mossoró.

Agradeço aos meus sogros, Cícero Souza e Maria de Jesus, pelo suporte, e a João Amorim, Cléber e Fábio pela parceria e amizade, mesmo distante.

Agradeço ao Instituto Agronômico de Pernambuco, na pessoa do Dr. José Nildo Tabosa, pelo fornecimento das sementes de sorgo SF-15.

Agradeço à banca examinadora pelas contribuições, especialmente ao Dr. Glauber Nunes, pelo auxílio nas análises estatísticas.

Agradeço a todos que, de alguma forma contribuíram para a realização do meu trabalho!

Senhor, Fazei de mim um instrumento de vossa paz! Onde houver ódio, que eu leve o amor, onde houver ofensa, que eu leve o perdão. Onde houver discórdia, que eu leve a união. Onde houver dúvida, que eu leve a fé. Onde houver o erro, que eu leve a verdade. Onde houver desespero, que eu leve a esperança. Onde houver tristeza, que eu leve a alegria. Onde houver trevas, que eu leve a luz! Ó Mestre, fazei que eu procure mais. Consolar, que ser consolado. Compreender, que ser compreendido. Amar, que ser amado. Pois é dando, que se recebe. Perdoando, que se é perdoado e é morrendo, que se vive para a vida eterna!

São Francisco de Assis

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas, sobre cultivares de sorgo de biomassa e sacarino. Foram conduzidos quatro experimentos: dois no sítio Cumaru, no município de Upanema-RN, entre setembro e dezembro de 2023, em Cambissolo Háplico, e dois na fazenda experimental Rafael Fernandes, pertencente à UFERSA, no município de Mossoró-RN, entre outubro de 2023 e janeiro de 2024, em Latossolo Vermelho-Amarelo. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com oito tratamentos: T1 (sem déficit), T2 (déficit nas fases II, III e IV), T3 (déficit nas fases III e IV), T4 (déficit na fase IV), T5 (déficit na fase III), T6 (déficit na fase II), T7 (déficit nas fases II e III) e T8 (déficit nas fases II e IV), com quatro repetições, utilizando as cultivares IPA SF-15 e BRS-506, em dois ambientes. O estresse hídrico foi aplicado com base na evapotranspiração máxima da cultura, utilizando 100% da ETc nos tratamentos sem estresse e 50% nos tratamentos com estresse, com valores de KcbIII e KcbF de 1,00 e 0,70, respectivamente. Foram avaliadas as produtividades de massa fresca e seca, a produtividade e a qualidade do caldo, e a composição nutricional da folha. Os experimentos com a mesma cultivar foram avaliados de forma conjunta. Para a cultivar IPA SF-15 (sorgo biomassa), o déficit hídrico influenciou significativamente as produtividades de massa fresca e seca, sendo os menores incrementos de massa fresca encontrados nos tratamentos com estresse nas fases II, III e IV; nas fases II e III; e nas fases II e IV, com produtividades médias de 45,82; 46,01 e 45,28 Mg ha⁻¹, respectivamente. Para a cultivar BRS-506 (sorgo sacarino), o déficit hídrico não afetou a absorção de nutrientes nem a qualidade do caldo. A aplicação de déficit hídrico em diferentes fases fenológicas reduziu a produção de massa fresca tanto para o sorgo biomassa quanto para o sorgo sacarino. A fase II foi a menos tolerante ao déficit hídrico, enquanto a fase III mostrou maior tolerância. A aplicação do estresse na fase IV mostrou-se uma alternativa viável para ambas as cultivares.

Palavras-chave: Forragem, ORDI, Etanol, Déficit hídrico.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of water deficit at different phenological stages on biomass and sweet sorghum cultivars. Four experiments were conducted: two at the Cumaru site, in the municipality of Upanema, Rio Grande do Norte, Brazil, between September and December 2023, on a Haplic Cambisol, and two at the Rafael Fernandes Experimental Farm, belonging to the Federal Rural University of the Semi-Arid Region (UFERSA), in Mossoró, Rio Grande do Norte, Brazil, between October 2023 and January 2024, on a Red-Yellow Latosol soil. The experimental design consisted of randomized blocks with eight treatments: T1 (no deficit), T2 (deficit during stages II, III, and IV), T3 (deficit during stages III and IV), T4 (deficit during stage IV), T5 (deficit during stage III), T6 (deficit during stage II), T7 (deficit during stages II and III), and T8 (deficit during stages II and IV), with four replications, using the cultivars IPA SF-15 and BRS-506 in two environments. Water stress was applied based on the maximum crop evapotranspiration, using 100% of ETC in the non-stress treatments and 50% in the stress treatments, with KcbIII and KcbF values of 1.00 and 0.70, respectively. The following parameters were evaluated: fresh and dry biomass yield, juice yield and quality, and leaf nutritional status were evaluated. The experiments with the same cultivar were analyzed jointly. For the IPA SF-15 cultivar (biomass sorghum), water deficit significantly affected fresh and dry biomass yield, with the lowest fresh biomass yields observed in treatments with stress during stages II-III-IV, II-III, and II-IV, presenting average yields of 45.82, 46.01, and 45.28 Mg ha⁻¹, respectively. For the BRS-506 cultivar (sweet sorghum), water deficit did not affect nutrient uptake or juice quality. The application of water deficit at different phenological stages reduced fresh biomass production in both biomass and sweet sorghum. Stage II was the least tolerant to water deficit, whereas stage III showed greater tolerance. The application of stress during stage IV proved to be a viable alternative for both cultivars.

Keywords: Forage. ORDI. Ethanol. Water deficit.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1 - Morfologia da cultura do sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.).....	27
Figura 2 - Fases fenológicas da cultura do sorgo	29
Figura 3 - Curva de Kc da cultura do sorgo.....	32

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 1 - Localização da área experimental I em Upanema, RN, Brasil	48
Figura 2 - Localização da área experimental II na Fazenda Rafael Fernandes, Mossoró, RN, Brasil.....	48
Figura 3 - Temperatura máxima, mínima, radiação solar e ET_0 obtidas nos ambientes I (A, B) e II (C, D).....	51
Figura 4 - Valores de Kc e Ky obtidos durante a condução experimental nos ambientes I (A) e II(B)	52
Figura 5 - Lâminas de irrigação aplicadas, médias semanais, ao longo do ciclo da cultura do sorgo no ambiente I(A) e no ambiente II(B) e precipitações pluviais efetivas.....	53
Figura 6 - Valores de Y_o e Y_a (6A), Y_a/Y_o (6B) e ET_a/ET_m (6C) a serem alcançadas pelos cronogramas de irrigação dos tratamentos ORDI.....	60
Figura 7 - Porcentagem de água de irrigação economizada com a implantação de cada tratamento	62

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO III

Figura 1 - Mapas da localização dos ambientes I (A) e II (B).....	82
Figura 2 - Valores de Kc obtidos durante a condução experimental nos ambientes I (A) e II(B)	84
Figura 3 - Lâminas de irrigação aplicadas e precipitações pluviais médias em cada fase e total, ao longo do ciclo da cultura do sorgo, nos ambientes I (A, C) e II (B, D)	85

Figura 4 - Valores de potencial matricial (ψ_m) durante a condução experimental no ambiente I	86
Figura 5 - Valores de potencial matricial (ψ_m) durante a condução experimental no ambiente II.....	87
Figura 6 - Curva de retenção do solo da área experimental nos ambientes ambiente I (5A) e ambiente II (5B).....	88
Figura 7 - Radiação solar e evapotranspiração de referência (ET _o) (A) e temperaturas média, máxima e mínima (B), obtidas nos ambientes I e II.....	89

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1 - Identificação dos estágios de crescimento do sorgo	29
Tabela 2 - Coeficiente de cultivo da cultura do sorgo	31
Tabela 3 - Demanda hídrica do sorgo de acordo com o estágio fenológico	33
Tabela 4 - Culturas ajustadas ao ORDI.....	34
Tabela 5 - Principais resultados obtidos com a aplicação do modelo.....	35
Tabela 6 - Principais desafios na implementação do modelo ORDI	37

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 1 - Análise dos componentes físicos e químicos dos solos nos ambientes I e II.....	49
Tabela 2 - Lâmina de irrigação aplicada em cada fase de desenvolvimento do sorgo	54
Tabela 3 - Condutividade elétrica composição química da água de irrigação utilizada nos ambientes I e II	54
Tabela 4 - Valores de Graus-dia (GD) acumulados, Graus-dia (GD) por fase e duração média das fases fenológicas do sorgo biomassa cultivado em dois ambientes distintos	63

Tabela 5 - Análise de variância do efeito do estresse hídrico em diferentes fases fenológicas sobre o crescimento e a produtividade do sorgo biomassa.....	64
Tabela 6 - Efeito do estresse hídrico (médias) em diferentes fases fenológicas na produtividade de massa verde e seca, produtividade da água, altura e planta e diâmetro do colmo do sorgo biomassa, considerando a média dos dois ambientes	65
Tabela 7 - Produtividade de massa verde, massa seca, produtividade da água, altura de planta e diâmetro do colmo do sorgo biomassa sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.....	65
Tabela 8 - Média de Produtividade de massa verde e seca, produtividade da água, altura de planta e diâmetro do colmo fenológicas do Sorgo biomassa sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	66
Tabela 9 - Análise de variância dos teores nutricionais do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	67
Tabela 10 - Médias dos teores foliares de micronutrientes do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	68
Tabela 11 - Médias dos teores foliares de micronutrientes do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes	68
Tabela 12 - Médias dos teores foliares de macronutrientes do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.....	69
Tabela 13 - Médias dos teores foliares de macronutrientes do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.....	69
Tabela 14. Médias dos macronutrientes foliares do sorgo biomassa sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas cultivado em dois ambientes	70

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO III

Tabela 1 - Condutividade elétrica composição química da água de irrigação	85
Tabela 2 - Resumo da ANOVA (estatística F) das variáveis produtivas do sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	91
Tabela 3 - Efeito do estresse hídrico em diferentes fases fenológicas na produtividade de massa seca e massa fresca, peso do caldo e produtividade da água do sorgo sacarino,	

considerando	as	médias	de	dois	
ambientes					93

Tabela 4 - Médias da produtividade de massa fresca e seca, produção de caldo e produtividade da água do sorgo sacarino submetido a estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, avaliadas em dois ambientes	94
---	----

Tabela 5 - Valores médios da massa fresca e seca, produção de caldo e produtividade da água do sorgo sacarino em dois ambientes sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	95
---	----

Tabela 6 - Resumo da ANOVA dos teores de nutrientes foliares em sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	96
--	----

Tabela 7 - Médias dos teores de micronutrientes foliares do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, avaliados em dois ambientes distintos	97
--	----

Tabela 8 - Médias dos teores de micronutrientes foliares do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, avaliadas em dois ambientes	97
--	----

Tabela 9 - Médias isoladas de micronutrientes foliares em sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes	98
---	----

Tabela 10 - Médias de macronutrientes foliares e Sódio em sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	99
--	----

Tabela 11 - Médias dos teores de macronutrientes foliares e de Sódio do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	99
---	----

Tabela 12 - Médias isoladas dos teores de macronutrientes foliares do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	100
---	-----

Tabela 13 - Resumo da análise de variância (estatística F) para as variáveis qualitativas do caldo do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	101
---	-----

Tabela 14 - Médias de variáveis qualitativas do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas	102
---	-----

Tabela 15 - Médias de variáveis qualitativas do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes	102
--	-----

Tabela 16 - Médias dos teores das variáveis qualitativas do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico nas diferentes fases fenológicas, avaliadas em dois ambientes	103
---	-----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
2. CAPÍTULO I - OTIMIZAÇÃO DO USO DE ÁGUA PELO SORGO UTILIZANDO COMO ESTRATÉGIA O ESTRESSE HÍDRICO POR FASES FENOLÓGICAS: UMA REVISÃO	23
RESUMO.....	23
ABSTRACT.....	24
INTRODUÇÃO	25
Aspectos Gerais do Cultivo de Sorgo e Sua Importância Socioeconômica	26
Estádios de crescimento e desenvolvimento do sorgo	28
Demanda hídrica da cultura do sorgo	29
Manejo da irrigação por déficit hídrico regulado e otimizado	33
Aplicação da irrigação por déficit hídrico regulado e otimizado	34
Principais limitações à aplicação da irrigação com déficit hídrico regulado e otimizado	36
CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
3. CAPÍTULO II - DESEMPENHO DO <i>Sorghum bicolor</i> SOB MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM DÉFICIT HÍDRICO REGULADO E OTIMIZADO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO.....	44
RESUMO.....	44
ABSTRACT.....	45
INTRODUÇÃO	46
MATERIAIS E MÉTODOS	47
Condução experimental.....	47
Preparo do solo, Material vegetal e delineamento experimental.....	49
Manejo de irrigação.....	49
Simulação do rendimento da cultura.....	54
Validação da estratégia ótima de irrigação	54
Determinação dos graus-dia para a cultura do sorgo	57
Rendimento de forragem	57

Análise nutricional	58
Análise estatística.....	58
RESULTADOS.....	59
Validação da estratégia ótima de irrigação	59
Determinação dos graus-dia para a cultura do sorgo	62
Rendimento de forragem	63
Análise nutricional	67
Análise de micronutrientes.....	68
Análise de macronutrientes	68
DISCUSSÃO	70
Validação da estratégia ótima de irrigação	70
Rendimento de forragem	72
Análise nutricional	74
Análise de micronutrientes.....	75
Análise de macronutrientes	72
CONCLUSÃO	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
4. CAPÍTULO III - PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA E ETANOL DO SORGO SACARINO SOB ESTRESSE HÍDRICO EM DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS	81
RESUMO.....	81
ABSTRACT.....	82
INTRODUÇÃO	83
MATERIAIS E MÉTODOS	84
Localização dos experimentos I e II e clima	84
Delineamento experimental e material vegetal	83
Preparo da área e manutenção experimental	83
Aplicação da lâmina de irrigação	83
Monitoramento climático	88
Rendimento de forragem.....	89
Análises nutricionais	90
Produção de etanol e cogeração de energia.....	91
Análise estatística	91
RESULTADOS.....	92

Rendimento de forragem.....	92
Análises nutricionais	96
Micronutrientes	97
Macronutrientes	98
Qualidade do caldo e produção de etanol	100
DISCUSSÃO	104
Rendimento de forragem e produção de caldo	104
Análises nutricionais	106
Micronutrientes	107
Macronutrientes	107
Qualidade do caldo e produção de etanol	108
CONCLUSÃO	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110

1. INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido brasileiro é um dos mais extensos do mundo, ocupando uma área superior a 1 milhão de km² e abrigando aproximadamente 24 milhões de pessoas (Sudene, 2017). Grande parte da população local tem como principais atividades econômicas a agricultura e a pecuária, com destaque para a criação de ovinos, bovinos e caprinos, além de cultivos agrícolas que, na maioria das vezes, são desenvolvidos sob regime de sequeiro (Santos et al., 2023).

Devido às características edafoclimáticas presentes nessa região (i.e., elevadas temperaturas, alta taxa de evapotranspiração e baixas pluviosidades), o desenvolvimento de estratégias que possam mitigar os efeitos do clima sobre a produção agropecuária torna-se um desafio para produtores e pesquisadores voltados ao semiárido (Moura et al., 2019; Li et al., 2022). Dentre as estratégias mais viáveis, destaca-se a priorização do cultivo de espécies adaptadas às condições climáticas presentes locais, por representar uma alternativa capaz de proporcionar maior retorno econômico e ambiental.

Em meio a essas espécies, enfatizar destaca-se a importância do cultivo do sorgo. Por apresentar metabolismo C₄, sistema radicular profundo e bem desenvolvido, cerosidade nas folhas e elevada eficiência fotossintética; o sorgo é capaz de atingir altas produtividades mesmo em ambiente semiárido (Dias-Martins et al., 2018; Seth et al., 2025). Além disso, a cultura apresenta demanda hídrica que varia entre 300 e 550 mm por ciclo, intervalo de valores que se enquadra dentro das precipitações anuais do semiárido, que possui média de aproximadamente 800 mm ano⁻¹ (Pereira et al., 2025, Costa et al., 2025).

Além da elevada adaptabilidade a ambientes com restrição hídrica, o sorgo apresenta ampla diversidade produtiva, que vai desde a fabricação de vassouras até a produção de etanol, destacando-se também na produção de forragem e sendo considerado um dos cinco cereais mais importantes do mundo (Seth et al., 2025). Essa diversidade é resultado das diferentes variedades de sorgo existentes, que se dividem em seis tipos principais: forrageiro, de pastejo, sacarino, vassoura, biomassa e granífero. Cada um desses tipos atende a mercados específicos, ampliando a diversidade mercadológica e a importância econômica da cultura (Schaffert et al., 2024).

É importante destacar dois tipos de sorgo: o sorgo biomassa e o sorgo sacarino, pois, além da aptidão para produção de forragem, ambos são utilizados para geração de energia. O sorgo biomassa é geralmente destinado à produção de energia de segunda geração, apresenta

porte elevado (podendo atingir até 5 metros) e possui alto teor de lignina no colmo (Guerra et al., 2025). Já o sorgo sacarino é utilizado como matéria-prima para produção de energia de primeira geração, caracterizando-se pelo elevado teor de umidade no colmo e pelo acúmulo de açúcares (Fontanet-Manzaneque et al., 2025; Khaskheli et al., 2025). Essas características morfológicas se assemelham às da cana-de-açúcar, permitindo uma produtividade de até 3.000 litros de etanol por hectare de sorgo (Lira et al., 2023).

Embora essa cultura possua elevada capacidade produtiva e seja adaptada ao estresse hídrico, é fundamental avaliar como ela responde a essa condição em cada fase do seu desenvolvimento fenológico (Fontanet-Manzaneque et al., 2025). Além disso, é importante estudar o impacto do estresse hídrico sobre as variáveis agronômicas relevantes, como a produtividade, o crescimento vegetativo e a resposta nutricional. De acordo com Steduto et al. (2012), o estresse hídrico pode ocasionar diversos efeitos no sorgo, como perfilhamento excessivo, morte da panícula, perfilhos estéreis, aumento ou redução na produção de biomassa, e diminuição na produção de grãos. Esses impactos variam conforme a fase fenológica em que a planta é submetida ao estresse hídrico. Uma das formas de amenizar esses impactos do estresse hídrico sobre a produção do sorgo é identificar as fases mais sensíveis da planta e evitar sua exposição ao estresse nessas fases, bem como aplicá-lo nas fases mais resistentes, nas quais a planta tem maior capacidade de tolerância.

Nesse contexto, Dominguez et al. (2012) desenvolveram a metodologia de Irrigação com Déficit Regulado e Otimizado (ORDI), que auxilia os produtores a identificar as fases mais sensíveis, ao mesmo tempo em que reduz o consumo de água durante o ciclo da cultura. A metodologia funciona como uma ferramenta de apoio à decisão agrícola, integrando informações sobre as características da cultura, do clima e do solo. Com dados como o coeficiente de cultivo, o coeficiente de estresse, a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência, o modelo consegue estimar os volumes de irrigação necessários e otimizar a eficiência dos sistemas irrigados (Léllis et al., 2017; Martínez-Romero et al., 2019; Leite et al., 2021).

Embora promissora, a ferramenta ainda é pouco utilizada, pois requer calibração e validação para muitas culturas. Nesse contexto, o objetivo do estudo aqui apresentado foi analisar o efeito do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas sobre a produtividade, a absorção de nutrientes e a produção de etanol do sorgo sacarino cultivado em ambiente

semiárido. Além disso, buscou-se aplicar a metodologia ORDI para determinar as estratégias de irrigação na cultura do sorgo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Costa, W. F., & Carvalho, A. T. F. (2025). Distribuição de veranicos e indicativos de riscos aos cultivos de milho, feijão-caupi e sorgo na microrregião de Pau dos Ferros/Rio Grande do Norte. *Geografia (Londrina)*, 34(1), 71-90.

Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., & Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175–186.

Domínguez, A., De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Martínez, R. S., & Martínez-Romero, A. (2012). Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 67–77a. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.003>

Fontanet-Manzaneque, J. B., Hernández, D. M., Giordano, A., & Caño-Delgado, A. I. (2025, September 24). Sorghum as a monocot model for drought research. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1665967. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1665967>

Guerra, J. V. S., Cavallin, I. C., da Costa Parrella, R. A., de Carvalho, A. J., Portugal, A. F., dos Anjos, J. D. R. N., ... & Godinho, V. D. P. C. (2025). Adaptabilidade e estabilidade de genótipos de sorgo biomassa pelo método GGE Biplot. *Revista Caatinga*, 38, e12509-e12509.

Khaskheli, M. A., Nizamani, M. M., Tarafder, E., Das, D., Nosheen, S., Muhae-Ud-Din, G., ... & Yang, S. W. (2025). Sustainable management of major fungal phytopathogens in Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) for food security: A comprehensive review. *Journal of Fungi*, 11(3), 207.

Leite, K. N., de Carvalho, D. F., Martin-Benito, J. M. T., de Sousa, G. G., & Padilla, A. D. (2021). Optimized regulated deficit irrigation management for watermelon cultivation in a semiarid region. *Journal of Agricultural Studies*, 9(2), 113-129. <https://doi.org/10.5296/jas.v9i2.18088>

Léllis, B. C., Carvalho, D. F., Martínez-Romero, A., Tarjuelo, J. M., & Domínguez, A. (2017). Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil. *Agricultural Water Management*, 192, 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.025>

Li, X., et al. (2022). Analysis of spatial-temporal variation of the saline-sodic soil in the west of Jilin Province from 1989 to 2019 and influencing factors. *Catena*, 217, 106492. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106492>

Lira, R. B., Ferreira-Neto, M., da Silva Dias, N., de Medeiros, J. F., de Brito, R. F., de Lemos, M., ... da Silva Sá, F. V. (2023). Biomass, grain yield, ethanol production, and energy cogeneration of sweet sorghum irrigated with domestic sewage effluent. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(10), 9131–9140. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-08500-4>

Martínez-Romero, A., Domínguez, A., & Landeras, G. (2019). Estratégias de irrigação com déficit regulado para diferentes cultivares de batata em condições continentais mediterrâneas-atlânticas. *Agricultural Water Management*, 216, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.002>

Moura, M. S. B. de, Espínola Sobrinho, J., Silva, T. G. F. da, & Souza, W. M. de. (2019). Aspectos meteorológicos do Semiárido brasileiro. In L. F. Ximenes, M. S. L. da Silva, & L. T. de L. Brito (Eds.), *Tecnologias de convivência com o Semiárido brasileiro* (pp. 85–104). Banco do Nordeste do Brasil.

Pereira, L. S., Allen, R. G., Paredes, P., López-Urrea, R., Raes, D., Smith, M., Kilic, A., & Salman, M. (2025). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (2nd ed., rev.). FAO Irrigation and Drainage Paper, 56 Rev.1. <https://doi.org/10.4060/cd6621en>

Santos, A. D., Bezerra, R. C. A., Cordeiro, L. R. B. A., Leite, M. L. M. V., Salvador, K. D. S., Sousa, L. D. C., ... & Silva, T. G. F. (2023). Valor nutritivo de plantas forrageiras cultivadas no semiárido brasileiro: Uma revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(3), 1466–1489.

Schaffert, S. (2015/2016). CAPÍTULO 10–Desempenho Agronômico e Tecnológico de Genótipos de Sorgo Sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] no Distrito Federal. *Pesquisa e Inovação em*, 91.

Seth, D., Kumari, P., Pramanik, S., Das, A., & Madhusudhana, R. (2025). Role of omics for enhancing abiotic stress resilience in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*, 1-18.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water (Vol. 1028, p. 99). FAO.

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. (2017). *Delimitação do semiárido*. Disponível em: <http://sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>. Acesso em: 18 fev. 2026.

2. CAPÍTULO I: OTIMIZAÇÃO DO USO DE ÁGUA PELO SORGO UTILIZANDO COMO ESTRATÉGIA O ESTRESSE HÍDRICO POR FASES FENOLÓGICAS: UMA REVISÃO

RESUMO

Esta revisão de literatura possui abordagem qualitativa e foi realizada por meio da busca de artigos que foram sintetizados para produzir uma revisão direta e didática. O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), planta monocotiledônea pertencente à família Poaceae, é de origem africana e apresenta notável capacidade de suportar estresse hídrico, devido às suas características anatômicas, morfológicas e fisiológicas. A irrigação com déficit regulado e otimizado é uma estratégia aplicada de acordo com os estádios de desenvolvimento da planta, e sua aplicação depende de ajustes que variam conforme a cultura. Nesse contexto, entende-se que o sorgo é uma cultura de grande importância para diversos setores, como o energético e o agrônomo, continuando a ser objeto de extensas pesquisas. Além disso, evidencia-se que o modelo de Irrigação com Déficit Regulado Otimizado é uma metodologia altamente promissora, merecendo maiores investimentos em estudos e desenvolvimento, com potencial para revolucionar a produção agrícola em ambientes semiáridos. Neste sentido, recomenda-se o aprofundamento dos estudos para calibrar a metodologia de Irrigação com Déficit Regulado Otimizado para o sorgo e para outras culturas de importância agrônoma.

Palavras-chave: MOPECO; ORDI; *Sorghum bicolor*.

CHAPTER I: OPTIMIZATION OF WATER USE BY SORGHUM USING WATER STRESS BY PHENOLOGICAL STAGES AS A STRATEGY: A REVIEW

ABSTRACT

This literature review adopts a qualitative approach and was conducted through a search of scientific articles, which were synthesized to produce a clear and didactic review. Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), a monocotyledonous plant belonging to the Poaceae family, is of Africa origin and has a remarkable ability to withstand water stress due to its anatomical, morphological, and physiological characteristics. Regulated and optimized deficit irrigation is a strategy applied according to the plant's developmental stages, and its implementation depends on adjustments that vary according to the crop. In this context, sorghum is understood to be a crop of great importance for various sectors, such as the energy and agronomy sectors, and it continues to be the subject of extensive research. Furthermore, it is evident that the Regulated Optimized Deficit Irrigation model is a highly promising methodology, deserving further investment in research and development, with the potential to revolutionize agricultural production in semi-arid environments. In this sense, it is recommended that studies be further developed to calibrate the Regulated Optimized Deficit Irrigation methodology for sorghum and for other crops of agronomic importance.

.Keywords: MOPECO; ORDI; *Sorghum bicolor*.

INTRODUÇÃO

A distribuição irregular das precipitações na estação chuvosa é a principal limitação para o desenvolvimento da agricultura e da pecuária na região semiárida (Holanda et al., 2016). Essa irregularidade na distribuição das chuvas, tanto entre os anos quanto ao longo do ano, impacta substancialmente a produção vegetal no bioma Caatinga, tornando-a, por muitas vezes, insuficiente para sustentar a alimentação dos rebanhos durante o período seco do ano (Sudene, 2017).

Nesse cenário, a produção de forragem durante o período de estiagem depende da irrigação. No entanto, há uma limitação quanto à quantidade e/ou à qualidade da água, devido à presença de altas concentrações de sais, o que dificulta a expansão da agricultura irrigada nessa região (Jardim et al., 2021). O uso de culturas adaptadas ao estresse hídrico e a adoção de práticas mitigadoras tornam-se essenciais para o desenvolvimento agrícola no semiárido, considerando que a maioria dos produtores dessa região está incluída no grupo dos agricultores familiares e que têm na agricultura familiar sua principal fonte de renda (Sudene, 2017).

Dessa forma, o sorgo (*Sorghum bicolor* L.), da família Poaceae, destaca-se por apresentar adaptação e alto potencial produtivo ao clima semiárido. Essa cultura apresenta o metabolismo fotossintético C4 e um sistema radicular bem desenvolvido, que favorecem uma elevada produção de forragem, mesmo em condições de estresse, como, por exemplo, baixa fertilidade, moderada salinidade e escassez hídrica (Ullah et al., 2017; Dias-Martins et al., 2018).

Nesse contexto, Neto (2023) observou que cultivares de sorgo de ciclo precoce apresentam menores exigências hídricas em comparação às de ciclo tardio, assim como ocorre com cultivares de milho. Isso evidencia as diferenças nos mecanismos de tolerância à seca entre cultivares e espécies. Apesar de sua elevada resistência ao estresse hídrico, essa tolerância pode variar de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta (Steduto et al., 2012). Eventos severos de déficit hídrico durante a fase de florescimento podem causar a morte da panícula principal. Em resposta, a planta passa a emitir novos perfilhos nos nós do colmo, que se desenvolvem e formam novas panículas, contribuindo para a mitigação das perdas de grãos (Hsiao et al., 1976). No entanto, o excesso de água durante a fase vegetativa

pode fazer com que a planta inicie a produção excessiva de perfilhos estéreis, aumentando a produção de biomassa, porém reduzindo a produtividade de grãos (Hsiao et al., 1976).

Embora exista variação entre os diferentes estádios de crescimento, o uso de determinadas ferramentas, como modelos de simulação, pode aumentar a eficiência do uso da água nas culturas (Dominguez et al., 2012a). Essas ferramentas podem ser aplicadas em diferentes contextos e atuar como sistemas de apoio à decisão (SAD), aprimorando o manejo dos recursos disponíveis. Essas estratégias são descritas como Irrigação com Déficit Regulada Otimizada (ORDI), permitindo a redução do consumo de água de acordo com os estádios de desenvolvimento da planta (Dominguez et al., 2012a).

Apesar dos avanços recentes na irrigação com déficit regulado, ainda não existe uma síntese abrangente avaliando como o modelo ORDI pode ser calibrado e ajustado para o *Sorghum bicolor*. Diante disso, a presente revisão integra perspectivas fisiológicas, agronômicas e de modelagem para identificar as limitações atuais e as oportunidades de pesquisa futura voltadas à otimização dos recursos hídricos.

Aspectos Gerais do Cultivo de Sorgo e Sua Importância Socioeconômica

Existem quatro espécies no gênero *Sorghum*: *S. bicolor*, *S. propinquum*, *S. halepense* e *S. alnum*. A espécie *Sorghum bicolor* é composta por três subespécies: *bicolor*, *verticilliflorum* e *drummondii*. A principal é a subespécie *bicolor*, que inclui as variedades cultivadas de sorgo. Dentro dessa subespécie, são reconhecidas cinco raças distintas, diferenciadas principalmente pela forma da inflorescência e pela estrutura das espiguetas (De Wet, 1978).

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), pertencente à família Poaceae, é uma planta monocotiledônea de origem africana (Berger et al., 2025), com elevado valor nutricional e agronômico, sendo considerado o quinto cereal mais importante do mundo (Kazugo et al., 2023; Rizvi et al., 2024).

O grão de sorgo apresenta variação de cor do branco ao marrom, com formato geralmente esférico, embora o tamanho e a forma possam variar (Purseglove, 1972). Ele possui três estruturas principais: pericarpo, endosperma e germe. Em algumas variedades, há também a presença da testa, uma camada adicional localizada entre o pericarpo e o endosperma, rica em taninos condensados. Essa estrutura influencia diretamente a qualidade nutricional, a cor e o sabor dos produtos alimentícios derivados do grão (Earp et al., 2004).

O sistema radicular do sorgo (Figura 1) é extenso, fibroso e rico em pelos absorventes (Magalhães et al., 2015), permitindo uma resposta rápida ao ambiente em que é cultivado. Isso o torna resiliente às alterações ambientais, especialmente ao estresse hídrico (Magalhães et al., 2013).

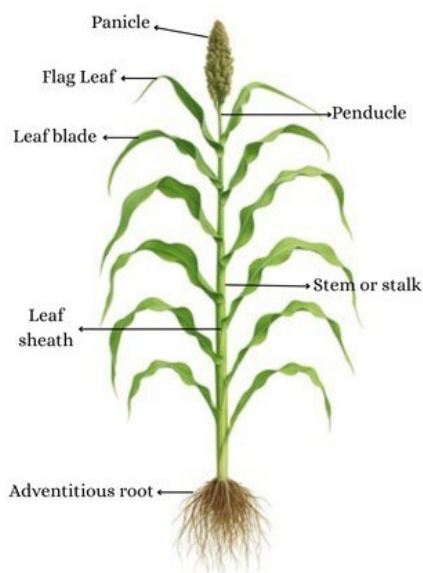


Figura 1. Morfologia da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L.).
Fonte: Adaptado de Pinheiro et al. (2021).

O cultivo no Nordeste brasileiro ocorre principalmente em regiões áridas e semiáridas (Impa et al., 2019), em função da sua adaptabilidade ao crescer em condições ambientais adversas. A planta apresenta metabolismo C4, o que lhe confere maior eficiência sob altas temperaturas. Essa característica permite elevadas taxas fotossintéticas com menor abertura estomática, reduzindo, assim, a perda de água (Assefa et al., 2010).

Existem diferentes tipos comerciais de sorgo, que são: I) o de biomassa, que possui rápido crescimento, alto potencial produtivo e destaque na utilização para produção de energia, tanto para a produção de biocombustíveis líquidos como na produção de etanol de segunda geração; II) o granífero, caracterizado por ter porte baixo a médio e por produzir uma panícula com grãos, os quais são o produto principal; III) o forrageiro, com porte alto, elevada produção de forragem, sendo muito utilizado na produção de silagem; IV) o sacarino, que apresenta colmo doce, semelhante à cana-de-açúcar, cujo caldo pode ser utilizado na produção de etanol e V) o sorgo vassoura, que possui a panícula apropriada para a fabricação de vassouras (Pereira Filho e Rodrigues, 2015; Almeida et al., 2019).

O Brasil é o 10º maior produtor dessa cultura, com uma produção de 5 milhões de toneladas no ano de 2024, frente a uma produção global de cerca de 62,36 milhões de toneladas. Os Estados Unidos lideram como o maior produtor (8,73 milhões de toneladas), seguidos pela Nigéria, Índia, México, Etiópia, Argentina, Sudão, China e Austrália (USDA, 2025).

Os estados brasileiros com a maior produção de sorgo na safra de 2024/2025 são Goiás (com 30,8% da produção nacional), Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Distrito Federal, Bahia, Maranhão, Piauí, Tocantins e por último o Pará (CONAB, 2025).

Estádios desenvolvimento do sorgo

O ciclo de desenvolvimento do sorgo é dividido em quatro fases: germinação, fase vegetativa, fase reprodutiva e maturação. Do ponto de vista do crescimento fenológico, essas fases são agrupadas nos estádios EC1, EC2 e EC3, conforme a classificação proposta pela Embrapa (2025). A fase EC1 é caracterizada pelo estágio vegetativo, estendendo-se da germinação até a formação da panícula. Nessa fase, o crescimento é lento, e a maior parte dos fotoassimilados é destinada ao alongamento foliar (Eastin, 1972; Oliveira et al., 2025). A fase EC2 ocorre no período que se estende do emborrachamento da panícula até o final do florescimento, sendo considerada uma das mais sensíveis ao estresse hídrico (Eastin, 1972; Oliveira et al., 2025).

Por outro lado, a fase EC3 ocorre no período entre o final da floração e a maturação fisiológica dos grãos. A maioria dos fotoassimilados produzidos é destinada à panícula. A Figura 2 apresenta as fases EC1, EC2 e EC3 (Eastin, 1972; Oliveira et al., 2025).

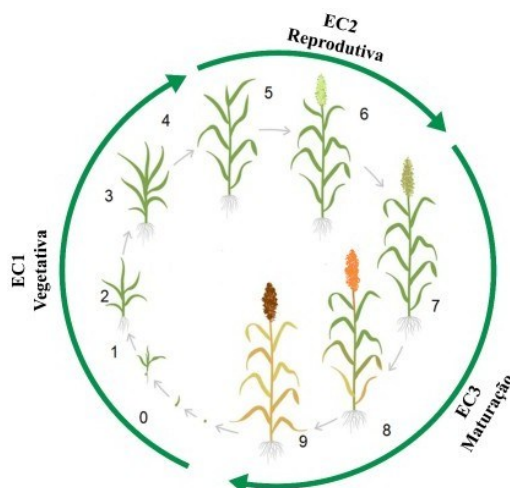


Figura 2. Fases fenológicas da cultura do sorgo.
Fonte: Oliveira et al. (2025).

Além disso, existem dez estádios de desenvolvimento (do estágio 0 ao 9), conforme proposto por Vanderlip e Reeves (1972). A caracterização de cada estágio é extremamente importante para auxiliar o manejo da irrigação da cultura (Oliveira et al., 2025), e a Tabela 1 apresenta os dez estádios e suas principais características.

Tabela 1. Identificação dos estágios de desenvolvimento do sorgo.

Fase	Estádio	Duração (Dias)	Característica
Emergência	E0		Rompimento da superfície do solo pela plântula
Vegetativa	E1	6	3 folhas totalmente expandidas
Vegetativa	E2	10	5 folhas totalmente expandidas
Vegetativa	E3	16	Diferenciação da gema apical
Vegetativa	E4	18	Folha bandeira visível
			Emborrachamento (caracterizado por uma protuberância ou um inchaço na bainha da folha bandeira)
Reprodutiva	E5	10	Florescimento (metade das plantas do campo apresenta metade da panícula em antese)
Reprodutiva	E6	8	Enchimento de grãos ou grão macio (Produção de um fluido leitoso nas espiguetas)
Maturação	E7	12	Amadurecimento ou grão duro (Os grãos alcançam 75% da sua massa seca final)
Maturação	E8	16	Maturidade fisiológica (os grãos apresentam máxima massa seca e o lado oposto do embrião fica escuro.)
Maturação	E9	10	

Fonte: Adaptado de (Oliveira et al., 2025; Rao et al., 2008).

Demanda hídrica da cultura do sorgo

O sorgo apresenta uma capacidade de resistir ao déficit hídrico que é oriunda de suas características anatômicas, morfológicas e fisiológicas, sendo elas: mecanismo respiratório do tipo C4, capacidade de paralisar o crescimento durante o estresse hídrico, sistema radicular

profundo, capacidade de regular a abertura estomática, osmorregulação e ciclo curto (Silva et al., 2023). Essas características morfofisiológicas explicam a elevada eficiência no uso da água (EUA), definida como a relação entre a produtividade e a evapotranspiração da cultura, sendo um parâmetro fundamental para a parametrização de modelos de irrigação, como o MOPECO e o ORDI (Domínguez et al., 2012).

Embora a cultura apresente elevada resistência ao déficit hídrico, essa resposta pode variar ao longo do desenvolvimento. Segundo Tardin et al. (2013), o estresse hídrico promove uma floração precoce, a qual reduz a fase vegetativa da cultura e a produção de biomassa. Como alguns estádios de crescimento são menos sensíveis ao déficit hídrico, a adoção de um manejo de irrigação baseado nos estádios fenológicos pode reduzir significativamente o consumo de água da cultura (Dominguez et al., 2012a). O manejo adequado da irrigação é essencial para a produtividade do sorgo e para a redução dos custos de produção.

Na abordagem do manejo da irrigação das culturas, utiliza-se a evapotranspiração da cultura (ET_c), que é baseada na evapotranspiração de referência (ET_0) e no coeficiente de cultura (K_c) (Allen et al., 1998). O coeficiente de cultura único (K_c único) incorpora os efeitos da evaporação do solo e da transpiração da cultura. Embora haja variações relacionadas às condições do solo e da planta, o K_c único é utilizado de forma média, sendo mais aplicado em sistemas de irrigação por aspersão, nos quais são utilizados volumes de água maiores e é possível trabalhar com valores médios de K_c em escala semanal (Allen et al., 1998).

No entanto, em sistemas de irrigação de alta frequência, o K_c dual é mais eficiente, pois considera separadamente o coeficiente de evaporação do solo (K_e) e o coeficiente basal da cultura (K_{cb}), o qual representa a razão entre ET_c/ET_0 quando o solo se encontra seco (Allen et al., 1998). Embora essa metodologia exija uma maior quantidade de cálculos matemáticos, ela apresenta maior precisão e eficiência para o manejo da irrigação em tempo real (Allen et al., 1998). Dessa forma, adota-se a equação 1.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: K_{cb} -Coeficiente basal do cultivo; K_e -Coeficiente de evaporação do solo.

O K_c é um fator adimensional que relaciona a evapotranspiração da cultura (ET_c) à evapotranspiração de referência (ET_0), conforme mostrado na Equação 2. Dessa forma, o K_c

é um parâmetro fundamental para o cálculo da demanda hídrica da cultura ao longo de todo o seu ciclo de desenvolvimento.

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (\text{Equação 2})$$

em que, ET_0 – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); ET_c – evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}).

Por outro lado, a ET_0 é definida como a evapotranspiração de uma superfície de referência composta por gramínea verde com altura uniforme de 0,12 m, que cobre totalmente o solo, bem irrigada e em crescimento ativo sob condições climáticas específicas (Allen et al., 1998), conforme a equação proposta por Penman-Monteith, FAO-56, apresentada na ,equação 3.

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)} \quad (\text{Equação 3})$$

em que, ET_0 = evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); R_n = saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G = densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T = temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 = velocidade de vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s = pressão de vapor de saturação (kPa); e_a = pressão parcial de vapor (kPa); Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Na Tabela 2, são apresentados os coeficientes de cultivo (K_c) para as diferentes fases do sorgo.

Tabela 2. Coeficiente de cultivo da cultura basal para a cultura do sorgo.

Cultura	K_{c_b} i	K_{c_b} med	K_{c_b} fin
Sorgo	0,3	1,1	1,105
Sorgo pastejo	0,5	0,9	0,85

Fonte: Adaptado de FAO 56. Evapotranspiración del cultivo. K_{c_b} i: coeficiente de cultivo basal inicial; K_{c_b} med: coeficiente de cultivo médio; K_{c_b} fin: coeficiente de cultivo final.

Observa-se na Tabela 2, que a fase inicial da cultura é a que apresenta menor demanda hídrica, mesmo sendo a fase mais susceptível ao estresse. De acordo com Wani et al. (2011), para um manejo correto da irrigação, é necessário evitar o déficit hídrico durante o período que abrange desde a emergência das panículas até a fase de enchimento dos grãos. Por outro lado, Mantoan et al. (2020) relataram que a exposição do sorgo ao estresse hídrico, durante a fase jovem, pode gerar maior tolerância durante as fases seguintes, pois ocorre redução na

área foliar, maior controle estomático e, conseqüentemente, redução da transpiração vegetal. Entretanto, essa adaptação pode acarretar redução na produtividade final da cultura, uma vez que diminuições na altura da planta e na área foliar interferem diretamente na produção.

A Figura 3 mostra a curva de Kc, representando os valores do coeficiente e os estádios de desenvolvimento da cultura do sorgo.

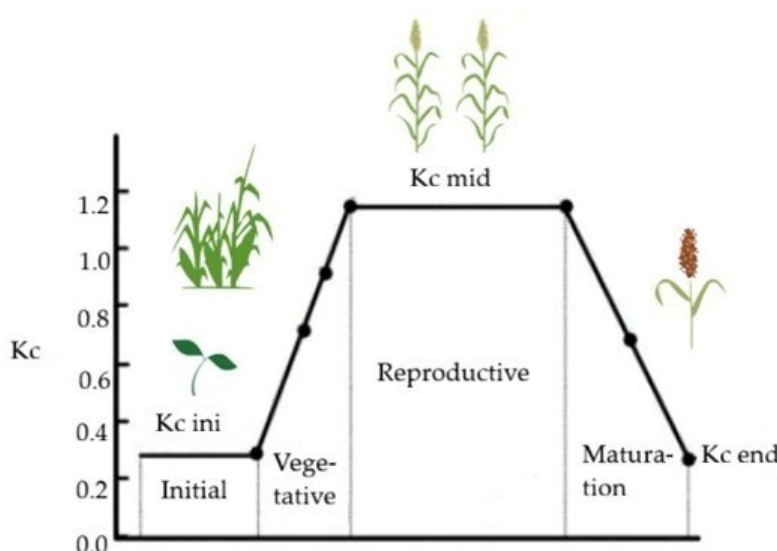


Figura 3. Curva de Kc da cultura do sorgo.

Fonte: Adaptado de Allen et al. (1998).

Além desses fatores, pode-se determinar o fator de resposta da produtividade ao déficit hídrico (K_y) (Equação 4). Esse parâmetro adimensional é utilizado para estimar a resposta produtiva de uma cultura submetida ao déficit de água (Stewart et al., 1977):

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m}\right) \quad (\text{Equação 4})$$

em que; Y_a – produtividade real obtida (kg/ha ou t/ha); Y_m – produtividade máxima potencial sob condições ideais de água; ET_a – evapotranspiração real da cultura (mm); ET_c – evapotranspiração da cultura sob condições ideais (mm); K_y – fator de resposta da produtividade. $K_y > 1$: a cultura é altamente sensível à falta de água nesse estágio; pequenas reduções em ET_c causam grandes perdas de produtividade. $K_y = 1$: a perda de produtividade é proporcional ao déficit hídrico. $K_y < 1$: a cultura é menos sensível; as perdas de produtividade são menores que o déficit hídrico.

De acordo com os valores de K_y apresentados na Tabela 3, observa-se que a fase de maturação apresenta a menor demanda hídrica, enquanto as fases vegetativa e de frutificação

apresentam maior consumo de água. Durante a fase de florescimento, a demanda hídrica é de 228,12 mm, representando quase metade do consumo total de água da cultura. Em contrapartida, a fase de maturação requer apenas 67,25 mm (Oliveira et al., 2014).

Adicionalmente, pode-se destacar que, em todos os estádios, $K_y < 1$, indicando que o sorgo apresenta resistência ao estresse hídrico ao longo de todo o seu ciclo de crescimento, embora o déficit de água não seja recomendável durante a fase inicial. Observa-se, ainda, que a fase de maturação é a mais favorável para a redução do consumo de água (Diakarte, 2014).

Tabela 3. Demanda hídrica do sorgo de acordo com o estágio fenológico.

Estágio	Duração (Dias)	Kc	Ky	Etc (mm)
I – Inicial	23	0.77	0.2	55.03
II – Vegetativa	29	0.93	0.4	135.05
III- Reprodutiva	40	1.36	0.55	228.12
IV- Maturação	10	1.06	0.2	67.25
Total	82		0.9	485.45

Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2014) e Diakarte (2014). Kc: coeficiente da cultura; Ky: fator de resposta da produtividade; ETc: evapotranspiração da cultura.

Manejo da irrigação por déficit hídrico regulado e otimizado

O déficit hídrico regulado e otimizado (ORDI) é uma metodologia desenvolvida pelo modelo de otimização econômica de irrigação (MOPECO) e utilizada por Domínguez et al. (2012a), na qual adota-se uma estratégia de irrigação através dos estágios de desenvolvimento da cultura (Eq. 5), os quais são divididos em quatro etapas: germinação, vegetação, reprodução e maturação.

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^4 \left(1 - K_{y_i} \times \left(1 - \frac{ET_{a_i}}{ET_{m_i}} \right) \right) \quad (\text{Equação 5})$$

em que: Y_a – rendimento obtido (kg ha^{-1}); Y_m – rendimento máximo na zona sob condições ótimas de cultivo e ausência de estresse hídrico (kg ha^{-1}); K_y – coeficiente de estresse do cultivo para a etapa i de desenvolvimento; ET_{a_i} – evapotranspiração real acumulada na etapa i (mm); e ET_{m_i} – evapotranspiração máxima acumulada na etapa i (mm) para produzir Y_a e Y_m , respectivamente.

Além disso, utilizam-se alguns critérios para evitar que ocorra superestimação dos valores e rendimentos obtidos. Sendo assim, para a relação ET_a / ET_m , acumulada em cada

estágio, adota-se o valor de $y \geq 0,5$, conforme Allen et al. (1998), que assume que um estresse aplicado a uma determinada fase, mesmo que isolada, pode afetar o rendimento final da cultura. Dessa forma, adota-se o modelo descrito por Domínguez et al. (2012), que é uma adaptação da equação de Stewart et al. (1977), equação 6:

$$Y_a = Y_m \times \left(1 - K_{y_i} \times \left(1 - \left(\frac{ET_{akc(i)} + ET_{aky(i)}}{ET_{m_i}} \right) \right) \right) \times \prod_{k=2}^3 \left(1 - K_{y_k} \times \left(1 - \frac{ET_{ak}}{ET_{m_k}} \right) \right)$$

(Equação 6)

em que: Y_a rendimentos reais da cultura (kg ha^{-1}); Y_m rendimento potencial da cultura (kg ha^{-1}); k é o estágio de crescimento real (Allen et al., 1998); K_{y_k} o fator de resposta do rendimento da cultura por estágio de crescimento (Doorenbos e Kassam, 1979); ET_a e ET_m são a evapotranspiração acumulada da cultura em cada estágio de desenvolvimento k (mm).

O modelo ORDI possibilita uma simulação da uniformidade de irrigação, possibilitando uma redução do consumo hídrico e energético, além de reduzir o consumo de insumos agrícolas e potencializar o poder lucrativo de diversas áreas (Moradi, 2014). Embora a aplicação do ORDI possa promover inúmeros resultados benéficos, é necessário conhecer as fases fenológicas das culturas, pois o impacto do estresse hídrico vai depender da intensidade do estresse e da fase em que a cultura se encontra (Domínguez et al., 2012b).

Portanto, a adoção dessa metodologia requer uma quantidade elevada de informações como, a duração dos estágios de desenvolvimento em graus-dia e a calibração dos parâmetros necessários para obter a relação entre rendimento e água líquida. Além disso, dificultando sua aplicação.

Aplicação da irrigação por déficit hídrico regulado e otimizado

O modelo ORDI tem sido objeto de estudo em diversos países, mas a sua aplicação depende de ajustes que variam de acordo com a cultura. A Tabela 4 mostra as diferentes culturas que foram objeto desses estudos.

Tabela 4. Culturas ajustadas ao ORDI.

Cultura	Estratégia	Ano	Autor
<i>Allium cepa</i>	ORDI	2012	Domínguez et al. (2012)
<i>Zea mays</i>	ORDI	2012	Domínguez et al. (2012)
<i>Daucos carota</i> L.	ORDI	2017	Léllis et al. (2017)

<i>Solanum tuberosum</i>	ORDI	2019	Martínez-Romero et al. (2012)
<i>Hordeum vulgare</i>	ORDI	2020	Pardo et al. (2020)
<i>Allium sativum</i>	ORDI	2020	Sánchez-Virosta et al. (2020)
<i>Hordeum vulgare</i>	ORDIL	2022	Pardo et al. (2022)

Dominguez et al. (2012b) aplicaram a metodologia à cultura da cebola e observaram uma queda no rendimento com a aplicação de déficit hídrico na fase de bulbificação, enquanto o estágio de maturação apresentou a menor sensibilidade. Contudo, os autores observaram que a metodologia poderia superestimar os valores de produção da cultura.

Por outro lado, Dominguez et al. (2012a) observaram que para manter uma produtividade satisfatória na cultura do milho o estresse hídrico precisa ser aplicado nas fases de enchimento e maturação dos grãos. Entretanto, os autores ressaltam a importância de manter a reposição hídrica nas fases de emergência e desenvolvimento vegetativo.

Em relação à cenoura, Léllis et al. (2017) verificaram que a aplicação do modelo ORDI promoveu uma redução da produtividade total, quando comparado a cultivos sem déficit hídrico. Porém, os autores relatam que o ORDI é a estratégia ideal para aumentar o rendimento da água e a qualidade da colheita em cultivos de cenoura, sendo a estratégia ideal para lugares com insuficiência de recursos hídricos.

Para Martínez-Romero et al. (2019), cultivares de batata inglesa respondem de forma diferente ao estresse hídrico, sendo a cultivar Zorba a mais resistente. Entretanto, o autor indicou a possibilidade de aplicação de déficit na fase de maturação da cultura e propôs que fosse realizada a reposição hídrica na fase de formação. De forma geral, os autores ressaltam que a fase de maturação é a mais propícia à aplicação do estresse, enquanto as fases de germinação e desenvolvimento são as mais susceptíveis (Pardo et al., 2022, Sánchez-Virosta et al., 2020). A tabela 5 apresenta os principais resultados obtidos com o ORDI.

Tabela 5. Principais resultados obtidos com a aplicação do modelo.

<i>Citrullus lanatus</i>			
Tratamento (ETa/ETm)	Ya CDI (Kg ha ⁻¹)	Ya ORDI (Kg ha ⁻¹)	Irrigação (L planta ⁻¹)
1	39,108.8 A f	39,108.8 A e	549.3
0,9	38,074.4 B h	39,382.0 B g	453.3
0,8	36,964.2 C m	37,707.2 B l	402.4
0,7	36,776.5 C k	36,790.3 C j	352.1

<i>Daucus carota L.</i>				
Tratamento (ETa/ETm)	Ya total CDI (Kg ha ⁻¹)	Ya total ORDI (Kg ha ⁻¹)	WP CDI (kg m ⁻³)	WP ORDI (kg m ⁻³)
0,9	59966.75 a	60487.17 a	40,06	45,7
0,8	56550.73 a	51467.43 a	55,09	50,45
0,7	47843.82 a	47989.7 a	59,62	54,44
0,6	44714.81 a	43694.22 a	71,37	71,59
<i>Hordeum vulgare</i>				
Tratamento (ETa/ETm)	Ya ORDI (Kg ha ⁻¹)	EWP (€ m ⁻³)	W.S (%)	
1	8614	0,17	0	
0,9	7620	0,15	13,4	
0,8	7362	0,17	20,5	
0,7	6404	0,15	11,4	

Fonte: Adaptado de Lélis et al. (2017), Leite et al. (2021), Pardo et al. (2022). Ya: produtividade real da cultura; WP: produtividade da água; W.S: economia de água; CDI: déficit constante; EWP: produtividade econômica da água; ETa e ETm: evapotranspiração acumulada da cultura.

De acordo com os valores apresentados na Tabela 4, é possível observar os resultados obtidos com a aplicação do modelo ORDI em *Citrullus lanatus* sob diferentes níveis de déficit hídrico, bem como a comparação entre o modelo ORDI e o estresse contínuo (Leite et al., 2021). Verifica-se que a metodologia ORDI apresenta melhor desempenho em todos os níveis de estresse. Por outro lado, pode-se observar, a partir dos dados obtidos por Lélis et al. (2017) para a cultura *Daucus carota L.*, que a metodologia ORDI produziu resultados semelhantes aos obtidos com a irrigação por déficit constante. Assim, pode-se concluir que a eficácia da metodologia pode variar dependendo da cultura ou do ano de cultivo. Pardo et al. (2022), em um estudo com *Hordeum vulgare*, observaram que o uso do modelo pode levar a uma redução de até 20,5% no consumo de água, o que pode aumentar significativamente a produtividade das áreas cultivadas. De modo geral, observa-se que culturas hortícolas, como batata e cenoura, apresentam maiores perdas com a aplicação do ORDI.

Por outro lado, em cereais, como milho e cevada, a produção se mantém estável. Esse comportamento sugere que o sorgo, por também ser um cereal, pode apresentar respostas positivas à aplicação do modelo. Embora o modelo ORDI apresente uma grande inovação para a produção de diversas culturas, ainda não há registros na literatura sobre a sua aplicação na cultura do sorgo.

Principais limitações à aplicação da irrigação com déficit hídrico regulado e otimizado

Embora o modelo ORDI represente uma inovação significativa para a produção de diversas culturas, ainda existem várias limitações quanto ao seu uso. A Tabela 6 detalha os principais desafios na implementação desse modelo.

Tabela 6. Principais desafios na implementação do modelo ORDI.

Dificuldades	Limitação	Descrição Técnica
Dependência de dados climáticos e do solo	Necessidade de dados diários de ETo e umidade do solo	O modelo depende de séries meteorológicas completas e precisas (geralmente obtidas por meio de estações meteorológicas automáticas). Erros nesses dados podem comprometer a calibração do modelo MOPECO e a correta determinação dos níveis de ETa/ETm.
Complexidade operacional	Requer simulação e calibração prévia	A aplicação prática do ORDI requer conhecimento em modelagem, programação e estatística, além da calibração local da cultura (Ky, Kc, GDD, ETc).
Sensibilidade à variabilidade climática	Adaptabilidade limitada a mudanças climáticas abruptas	O modelo é baseado no conceito de “ano meteorológico típico”. Eventos extremos (ondas de calor, chuvas intensas ou secas atípicas) podem alterar a eficiência esperada do manejo.
Dificuldade em definir os estádios fenológicos	A identificação dos estádios fenológicos nem sempre é clara no campo.	Como os coeficientes Ky variam entre os estádios, erros na identificação das transições fenológicas podem levar à aplicação incorreta do déficit hídrico.
Falta de validação	Estudos focados em um número limitado de culturas.	A metodologia ainda é experimental para muitas culturas e regiões; extrapolações sem calibração local reduzem sua confiabilidade.
Limitação econômica	Requer investimento e capacitação.	Produtores em pequena escala ou sistemas de baixa tecnologia podem não dispor dos recursos necessários para calibrar e implementar o modelo.
Requer infraestrutura de irrigação	Requer controle preciso da lâmina de água aplicada.	O sistema deve permitir ajustes finos da lâmina de água e da uniformidade de aplicação (por exemplo, irrigação por gotejamento). Sistemas por aspersão ou em sulcos apresentam maior variabilidade na distribuição da água

Fonte: Dominguez et al. (2012a), Dominguez et al. (2012b) e Pardo et al. (2022).

De acordo com a Tabela 6, observa-se que a metodologia ORDI, embora muito promissora, apresenta várias limitações, principalmente de ordem financeira e técnica. Ao analisar os requisitos de dados para a utilização do modelo, verifica-se que sua implementação ainda é bastante restrita, demandando equipamentos de alto custo e de operação complexa. Além disso, há necessidade de operadores capacitados, aptos a coletar os dados, manusear os equipamentos e identificar os estádios fenológicos das culturas.

Ademais, a falta de calibração para algumas culturas de importância agrícola continua sendo um desafio acadêmico significativo. Portanto, embora o ORDI demonstre grande potencial para o manejo racional da irrigação, sua adoção, especialmente em regiões semiáridas, ainda depende da simplificação dos processos de calibração e da integração com ferramentas de monitoramento climático, acompanhamento fisiológico, monitoramento da umidade do solo e coleta de dados.

CONCLUSÃO

Constata-se que o modelo ORDI é uma metodologia bastante promissora, a qual merece ser aprimorada e possui potencial para revolucionar a produção agrícola em ambientes

semiáridos. No entanto, sua utilização depende da implementação de tecnologias e da realização de estudos que ajustem o modelo às culturas de importância agrícola, como o sorgo.

Recomenda-se, portanto, a realização de estudos que possibilitem a calibração da metodologia ORDI para a cultura do sorgo e para outras culturas de importância agrônômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.

Almeida, L. G. F., Parrella, R. A. C., Simeone, M. L. F., Ribeiro, P. C. O., Barbosa, G. M. P., Brito, P. L. B., Costa, A. S. V., & Santosa, A. S. (2019). Characterization of cell wall polysaccharides and cellulosic ethanol potential in genotypes of sorghum biomass. *International Journal of Development Research*, 9(4), 26810–26820.

Berger, A., Cakpo, B., Suire, C., Pagan, L., Roques, S., Vial, R., Aguilar, G., Terrier, N., & Granier, C. (2025). Single versus recurrent heat stress: A case study on the impact of a stress at flowering on the sorghum response to a subsequent post-flowering stress. *Environmental and Experimental Botany*, 235, 105656.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. (2025). Acompanhamento da safra brasileira: Grãos – Safra 2024/2025, 9º levantamento. <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>.

De Wet, J. M. J. (1978). Systematics and evolution of Sorghum sect. Sorghum (Gramineae). *American Journal of Botany*, 65(4), 477–484. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1978.tb09779.x>

Diakhate, D. (2014). Net Irrigation Requirements for Maize and Sorghum in ISRA-Nioro, Province of Kaolack (Senegal).

Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., & Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food

security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175–186.

Domínguez, A., De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Martínez, R. S., & Martínez-Romero, A. (2012). Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 67–77a. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.003>

Domínguez, A., Jiménez, M., Tarjuelo, J. M., De Juan, J. A., Martínez-Romero, A., & Leite, K. N. (2012). Simulation of onion crop behavior under optimized regulated deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 113, 64–75 b. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.07.003>

Doorenbos, J., Plusje, J. M. G. A., Kassam, A. H., Branscheid, V., & Bentvelsen, C. L. M. (1986). Yield response to water (Vol. 192). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Earp, C. F., McDonough, C. M., & Rooney, L. W. (2004). Microscopy of pericarp development in the caryopsis of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *Journal of Cereal Science*, 39(1), 21–27. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(03\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(03)00062-2)

EASTIN, J. D. Photosynthesis and translocation in relation to plant development. In: RAO, N. G. P.; HOUSE, L. R. (ed.). *Sorghum in seventies*. New Delhi: Oxford & IBH Publishing, 1972. p. 214-246.

FAO. (1998). Crop yield response to water: Irrigation and drainage paper 66. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

Holanda, J. S. de, Amorim, J. R. A. de, Ferreira Neto, M., Holanda, A. C., & Sá, F. V. (2016). Qualidade da água para irrigação. In H. R. Gheyi, N. S. Dias, C. F. Lacerda & E. Gomes Filho (Eds.), *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados* (2ª ed., pp. 35–47). INCTSal.

Hsiao, T. C., Acevedo, E., Fereres, E., & Henderson, D. W. (1976). Water stress, growth, and osmotic adjustment. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 273(927), 479–500. <https://doi.org/10.1098/rstb.1976.0026>.

- Impa, S. M., Perumal, R., Bean, S. R., Sunoj, V. S. J., & Jagadish, S. V. K. (2019). Water deficit and heat stress induced alterations in grain physico-chemical characteristics and micronutrient composition in field grown grain sorghum. *Journal of Cereal Science*, 86, 124–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.03.003>
- Jardim, A. M. D. R. F., da Silva, T. G. F., de Souza, L. S. B., Júnior, G. D. N. A., Alves, H. K. M. N., de Sá Souza, M., & de Moura, M. S. B. (2021). Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *Journal of Arid Environments*, 193, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104609>
- Kazungu, F. K., Muindi, E. M., & Mulinge, J. M. (2023). Overview of sorghum (*Sorghum bicolor* L.), its economic importance, ecological requirements and production constraints in Kenya. *International Journal of Plant & Soil Science*, 35, 62–71. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i430856>
- Leite, K. N., de Carvalho, D. F., Martin-Benito, J. M. T., de Sousa, G. G., & Padilla, A. D. (2021). Optimized regulated deficit irrigation management for watermelon cultivation in a semiarid region. *Journal of Agricultural Studies*, 9(2), 113-129. <https://doi.org/10.5296/jas.v9i2.18088>
- Léllis, B. C., Carvalho, D. F., Martínez-Romero, A., Tarjuelo, J. M., & Domínguez, A. (2017). Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil. *Agricultural Water Management*, 192, 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.025>
- Magalhães, K. S., Negri, B. F., & Sousa, S. M. (2013). Análise morfológica do sistema radicular do painel de diversidade de milho da Embrapa Milho e Sorgo. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 64. Embrapa Milho e Sorgo.
- Magalhães, P. C. C., Souza, T. C., & Schaffert, R. E. (2015). Ecofisiologia. In J. A. S. Rodrigues (Ed.), *Cultivo do sorgo* (9ª ed.). Embrapa Milho e Sorgo.
- Mantoan, L. P. B., Corrêa, C. V., Rainho, C. A., & Almeida, L. F. R. (2020). Rapid dehydration induces long-term water deficit memory in sorghum seedlings: Advantages and consequences. *Environmental and Experimental Botany*, 180, 104252. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104252>

- Martínez-Romero, A., Domínguez, A., & Landeras, G. (2019). Estratégias de irrigação com déficit regulado para diferentes cultivares de batata em condições continentais mediterrâneas-atlânticas. *Agricultural Water Management*, 216, 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.002>
- Moradi, R., Moghaddam, P. R., & Mansoori, H. (2015). Energy use and economical analysis of seedy watermelon production for different irrigation systems in Iran. *Energy Reports*, 1, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2015.10.001>
- Neto, E. R. (2023). Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de milho e sorgo em condições de segunda safra em Balsas-Maranhão [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista]. Repositório Institucional UNESP. <http://hdl.handle.net/11449/244056>.
- Oliveira, A. F. M., Silva, T. G. F., Zolnier, S., & Moura, M. S. B. (2014). Necessidades hídricas e desenvolvimento do sorgo nas condições do Semiárido brasileiro. In *Inovagri International Meeting 2014*.
- OLIVEIRA, I., MAGALHÃES, P., de Menezes, C. B., OLIVEIRA, I. C. M., & de MENEZES, C. B. (2025). *Estádios de crescimento e desenvolvimento do sorgo*. Embrapa.
- Ozeki, K., Miyazawa, Y., & Sugiura, D. (2022). Rapid stomatal closure contributes to higher water use efficiency in major C4 compared to C3 Poaceae crops. *Plant Physiology*, 189(1), 188-203. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac040>
- Pardo, J. J., Domínguez, A., Léllis, B. C., Montoya, F., Tarjuelo, J. M., & Martínez-Romero, A. (2022). Efeito da metodologia otimizada de irrigação com déficit regulado na qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da cevada em áreas com escassez hídrica. *Agricultural Water Management*, 266, 107573. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107573>
- Pereira Filho, I. A., & Rodrigues, J. A. S. (Eds.). (2015). *Sorgo: O produtor pergunta, a Embrapa responde*. Embrapa. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105925>
- Pinheiro, A. G., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., & Silva, T. G. F. (2021). Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira – Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(4), 2403–2426. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2403-2426>

Purseglove, J. W. (1972). *Sorghum bicolor* (L.) Moench. In *Tropical crops. Monocotyledons* (pp. 261–287). Longman Group Limited.

Rao, SS, Elangovan, M., Umakanth, AV, Seetharama, N., Reddy, BVS, Ramesh, S., ... & Gowda, CLL (2008). Caracterização da fenologia e estágios de crescimento de híbridos de sorgo. *Melhoramento do sorgo no novo milênio. (Eds.: REDDY BELUM, VS, RAMESH, S., ASHOK KUMAR, A. & GOWDA, GLL)* , 16-22.

Rizvi, A., Ahmed, B., Umar, S., & Khan, M. S. (2024). Comprehensive insights into sorghum (*Sorghum bicolor*) defense mechanisms unveiled: Plant growth-promoting rhizobacteria in combating Burkholderia-induced bacterial leaf stripe disease. *Plant Stress*, 11, Article 100289. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100289>

Sánchez-Virosta, A., Léllis, B. C., Pardo, J. J., Martínez-Romero, A., Sánchez-Gómez, D., & Domínguez, A. (2020). Functional response of garlic to optimized regulated deficit irrigation (ORDI) across crop stages and years: Is physiological performance impaired at the most sensitive stages to water deficit? *Agricultural Water Management*, 228, 105886. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105886>

Silva, N. F., Cunha, F. N., da Silva Cavalcante, W. S., Cabral Filho, F. R., Teixeira, M. B., & Cunha, G. N. (2023). Crescimento e desenvolvimento da cultura do sorgo sob déficit hídrico. *Irriga*, 28(4), 668–682. <https://doi.org/10.15809/irriga.2023v28n4p668>

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water (Vol. 1028, p. 99). FAO.

Stewart, J. I., Hagan, R. M., Pruitt, W. O., Danielson, R. E., Franklin, W. T., Hanks, R. J., Riley, J. P., & Jackson, E. B. (1977). Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil (Utah Water Research Laboratory Report 67). Utah State University

Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE. (2017). Relatório anual. <http://sudene.gov.br>

Tardin, F. D., de Almeida Filho, J. E., de Oliveira, C. M., Leite, C. E. P., de Menezes, C. B., Magalhães, P. C., & Schaffert, R. E. (2013). Avaliação agronômica de híbridos de sorgo granífero cultivados sob irrigação e estresse hídrico. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 12(2), 102–117.

Ullah, A., Ahmad, A., Khaliq, T., & Akhtar, J. (2017). Recognizing production options for pearl millet in Pakistan under changing climate scenarios. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(4), 762–773. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61577-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61577-4)

USDA. (2025). Production of sorghum in the United States. https://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0459200?utm_source=chatgpt.com

VANDERLIP, R. L.; REEVES, H. E. Growth stages of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]. *Agronomy Journal*, v. 64, n. 1, p. 13-16, 1972. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400010005x>.

2. CAPÍTULO 2: DESEMPENHO DO *Sorghum Bicolor* SOB MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM DÉFICIT HÍDRICO REGULADO E OTIMIZADO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

RESUMO

A cultura do sorgo apresenta a melhor eficiência no uso da água entre todos os cereais. Embora seja adaptada às condições de estresse hídrico, os efeitos desse estresse podem variar durante as fases do seu desenvolvimento, a depender da intensidade e da duração. Objetivou-se avaliar o efeito do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas do sorgo biomassa. Para isso, foram conduzidos dois experimentos de forma simultânea com a cultivar IPA SF-15. Um experimento foi conduzido no sítio Cumaru, no município de Upanema-RN, durante o período de setembro a dezembro de 2023, enquanto o segundo foi conduzido na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, pertencente à UFERSA, no período de outubro de 2023 a janeiro de 2024. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições e oito tratamentos, sendo: T1: sem estresse; T2: estresse nas fases II, III e IV; T3: estresse nas fases III e IV; T4: estresse na fase IV; T5: estresse na fase III; T6: estresse na fase II; T7: estresse nas fases II e III; e T8: estresse na fase II e IV. O estresse foi aplicado de acordo com a estimativa da evapotranspiração máxima da cultura, utilizando 100% nos tratamentos sem estresse e 50% para os tratamentos com estresse, adotando valores de KcbIII e KcbF de 1,00 e 0,70, respectivamente. Avaliou-se a produtividade de massa fresca e de massa seca e a análise nutricional da folha. Os resultados mostraram que o déficit hídrico influenciou significativamente a produtividade de massa fresca e seca do sorgo ($P < 0,05$), sendo os menores incrementos de massa fresca encontrados nos tratamentos T2, T7 e T8 com produtividades médias de 45,82; 46,01 e 45,28 Mg ha⁻¹, respectivamente. De forma geral, o déficit hídrico não afetou a absorção de macro e micronutrientes. O modelo ORDI pode ser utilizado no manejo hídrico do sorgo em ambientes semiáridos, configurando-se como uma importante ferramenta para otimizar o uso dos recursos hídricos em regiões de escassez de água.

Palavras-chave: Estresse hídrico. Fenologia. Produtividade. Semiárido. Sorgo biomassa.

CHAPTER 2: PERFORMANCE OF *Sorghum bicolor* UNDER REGULATED AND OPTIMIZED DEFICIT IRRIGATION MANAGEMENT IN A SEMI-ARID ENVIRONMENT

ABSTRACT

Sorghum (*Sorghum bicolor*) shows the highest water-use efficiency among all cereals. Although it is adapted to water stress conditions, the effects of such stress may vary throughout its developmental stages depending on the intensity and duration of the stress. This study aimed to evaluate the effect of water deficit at different phenological stages of biomass sorghum. Two experiments were conducted simultaneously using the cultivar IPA SF-15. One trial was carried out at the Cumaru site, in the municipality of Upanema, RN, Brazil, from September to December 2023, on a Haplic Cambisol. The other trial was conducted at the Rafael Fernandes Experimental Farm, belonging to the Federal Rural University of the Semi-Arid (UFERSA), in Mossoró, RN, Brazil, from October 2023 to January 2024, on a Red-Yellow Oxisol. A randomized complete block design was used with eight treatments: T1: no stress; T2: stress during stages II, III, and IV; T3: stress during stages III and IV; T4: stress during stage IV; T5: stress during stage III; T6: stress during stage II; T7: stress during stages II and III; and T8: stress during stages II and IV, with four replications. Stress was applied according to the estimated maximum crop evapotranspiration, using 100% for non-stress treatments and 50% for stress treatments, adopting KcbIII and KcbF values of 1.00 and 0.70, respectively. Fresh and dry mass yields (Mg ha^{-1}) and leaf nutritional status were evaluated. Data were subjected to normality and homoscedasticity analyses. After verification of assumptions, data were analyzed by analysis of variance using the F test. Water deficit significantly influenced fresh and dry mass yield of sorghum. The lowest fresh mass increments were observed in treatments with stress during stages II-III-IV, II-III, and II-IV, with average yields of 45.82, 46.01, and 45.28 Mg ha^{-1} , respectively. In general, water deficit did not affect macro- and micronutrient uptake. The ORDI model can be used in the water management of sorghum in semi-arid environments, constituting an important tool to optimize the use of water resources in water-scarce regions.

Keywords: Water stress; Phenology; Productivity; Semi-arid; Biomass sorghum.

INTRODUÇÃO

O *Sorghum bicolor* L. pertence à família Poaceae, sendo considerado um dos cereais mais importantes do mundo, atrás apenas do milho, da cevada e do arroz (Wahyuni et al., 2019). A cultura possui uma versatilidade produtiva que vai desde a alimentação humana até a

produção de etanol. Além disso, é adaptada às regiões com clima quente e seco (Lira et al., 2023). A adaptabilidade que o sorgo possui ao estresse hídrico é oriunda do seu metabolismo respiratório do tipo C4, do seu sistema radicular profundo e bem desenvolvido, da adaptação a dias longos e da elevada eficiência no uso da água (Marcelino et al., 2025). Ademais, a cultura possui variações morfológicas como serosidade no colmo e na folha e enrolamento das folhas nos horários mais quentes. Essas adaptações possibilitam uma redução na área foliar exposta, o que diminui a incidência de radiação solar na folha, minimizando a transpiração foliar e mantendo a turgidez da planta (Pinheiro et al., 2021).

Embora essa cultura apresente uma elevada tolerância ao estresse hídrico, seu rendimento final pode ser influenciado diretamente pelo estágio fenológico no qual o déficit ocorre. O estresse hídrico na fase de florescimento reduz o número de grãos na panícula, enquanto o estresse na fase de crescimento pode diminuir a altura da planta e reduzir a produção de massa seca da cultura (Wani et al., 2012). Nesse sentido, compreender como a cultura responde ao estresse ao longo de seu ciclo é fundamental para identificar os períodos mais sensíveis, orientar práticas de manejo e desenvolver estratégias de irrigação capazes de otimizar o uso da água, preservar o desempenho fisiológico das plantas e manter os níveis de produtividade e rentabilidade em áreas com elevados índices de escassez hídrica (Léllis et al., 2017).

Nesse contexto, destaca-se a estratégia de irrigação por déficit hídrico regulado e otimizado (ORDI), desenvolvida pelo modelo MOPECO, a qual tem sido aplicada com sucesso em diversas culturas agrícolas (Dominguez et al., 2012 a). Essa metodologia permite identificar os estágios críticos de sensibilidade ao estresse, estimar perdas potenciais de rendimento e propor estratégias de irrigação que maximizem a eficiência produtiva (Sánchez-Virosta et al., 2020). Além disso, a adoção dessa metodologia representa uma estratégia relevante para o cumprimento das metas estabelecidas pela Organização das Nações Unidas, no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6), meta 6.4, ao promover a maximização do uso eficiente da água em propriedades agrícolas e o aumento da produtividade hídrica de forma sustentável (FAO, 2024).

Alguns autores calibraram e validaram o ORDI, existindo calibração para as culturas da cevada (Pardo et al., 2020), do milho (Dominguez et al., 2012 a), e da cebola (Dominguez et al., 2012b). Por outro lado, ainda não existem registros na literatura que comprovem a aplicabilidade do ORDI para a cultura do sorgo, sendo essa uma lacuna a ser preenchida.

Diante do exposto, o estudo do déficit hídrico nas diferentes fases fenológicas do sorgo é fundamental para viabilizar a produção agrícola em ambientes semiáridos. Isso se torna relevante tanto para a produção em sequeiro, devido à variabilidade temporal das chuvas quanto para sistemas irrigados, onde há baixa disponibilidade hídrica e necessidade de otimizar a eficiência do uso da água.

Considerando essa lacuna no conhecimento, objetivou-se avaliar os efeitos da metodologia ORDI e validar sua aplicabilidade para o sorgo biomassa cultivado sob condições semiáridas. A partir dessa análise, busca-se contribuir para o aprimoramento do manejo hídrico da cultura, de modo a viabilizar sua adoção em regiões caracterizadas por disponibilidade limitada de água.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental

Foram conduzidos dois experimentos em condições de campo, ambos localizados no estado do Rio Grande do Norte, Brasil. O experimento I foi conduzido no período de setembro a dezembro de 2023 na área experimental do sítio Cumaru, município de Upanema/RN, sob coordenadas geográficas 5° 33' 30" S, 37° 11' 56" O, e altitude de 110 m (Figura 1). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é classificado como BSh', ou seja, clima tropical semiárido quente e seco (Alvares et al. 2013). O solo da área foi classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO, de textura franco-argilosa (Santos et al., 2025), apresentando uma retenção de água que varia de média a alta e capacidade de água disponível entre média e alta. Apresenta uma precipitação média anual de 650 mm e temperatura média anual de 28°C.

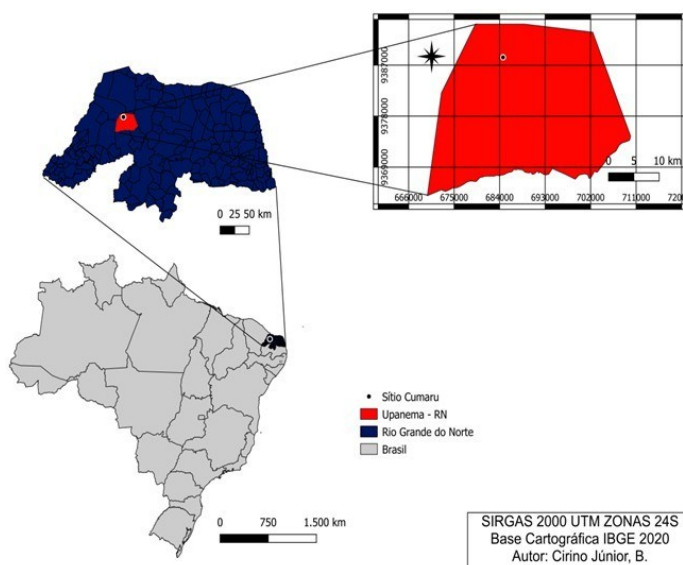


Figura 1. Localização da área experimental I em Upanema, RN, Brasil.

O experimento II foi conduzido no período de outubro de 2023 a janeiro de 2024 na fazenda experimental da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada na cidade de Mossoró-RN, possuindo as seguintes coordenadas: latitude 5°12'48" S, longitude 37°18'44" W e altitude de 72 m acima do nível do mar (Figura 2), onde o solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (Santos et al., 2025), com textura areia-franca, com baixa capacidade de água disponível. De acordo com a classificação climática de Köppen, a região possui clima semiárido do tipo BSh (Alvares et al. 2013), apresentando precipitação média anual de 673,9 mm e temperatura média anual de 27°C.

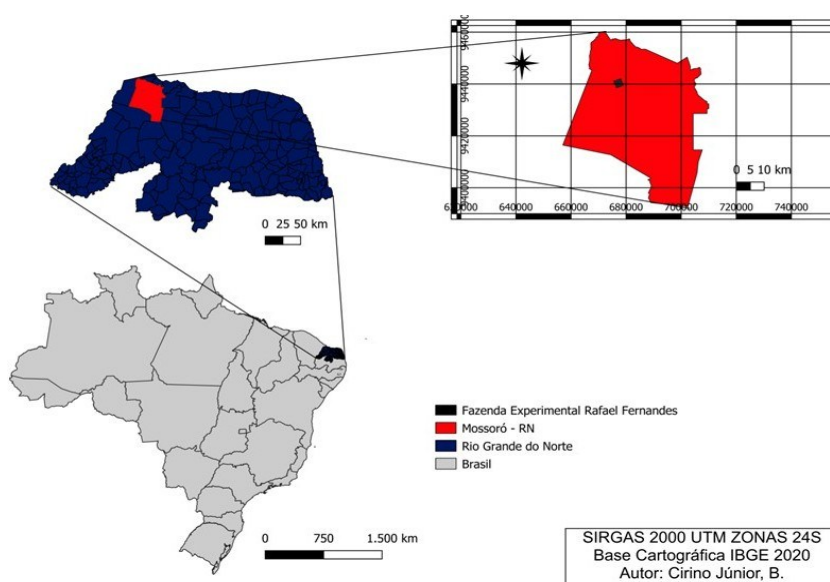


Figura 2. Localização da área experimental II na Fazenda Rafael Fernandes, Mossoró, RN, Brasil.

Preparo do solo, Material vegetal e Delineamento experimental

O preparo do solo foi realizado uma semana antes da instalação do experimento, por meio de aração e gradagem da área experimental. Foi avaliada a cultivar de sorgo de dupla aptidão IPA SF-15 (C1– produção de forragem e de grãos), cujo ciclo apresenta duração aproximada de 95 dias. A semeadura do sorgo foi feita em fileira dupla, com espaçamento entre fileiras de 1,40 e 0,20 metros e 0,05 metros entre plantas, com semeadeira manual. Após a emergência, realizou-se o desbaste, deixando 20 plantas por metro linear. O estande médio final de plantas no ambiente I foi de 125.000 plantas por hectare, enquanto no ambiente II foi de 93.750 plantas por hectare.

Em ambos os experimentos foi utilizado o delineamento em blocos casualizados (DBC), com oito tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram: T1 - sem estresse; T2 - estresse nas fases II, III e IV; T3 - estresse nas fases III e IV; T4 - estresse na fase IV; T5 - estresse na fase III; T6 - estresse na fase II; T7 - estresse nas fases II e III; e T8 - estresse na fase II e IV, totalizando 32 parcelas.

A adubação da área foi realizada de acordo com a análise química do solo de cada área (Tabela 1), utilizando a formulação de N-P-K, 14-07-28.

Tabela 1. Análise dos componentes físicos e químicos dos solos utilizados nos ambientes I e II.

Ambiente I (Profundidade 0-20 cm)								
P	K	Ca	Mg	Na	SB	CE	M.O	pH
mg dm ⁻³			cmocdm ⁻³			dSm ⁻¹	g kg ⁻¹	8,06
14,3	0,42	5,77	1,12	0,13	8,44	0,95	14,07	
Atributos físicos (0-20)								
	Areia			Silte			Argila	
	78%			6%			16%	
Ambiente II (Profundidade 0-20 cm)								
P	K	Ca	Mg	Na	SB	CE	M.O	pH
mg dm ⁻³			cmocdm ⁻³			dSm ⁻¹	g kg ⁻¹	6,18
6,24	0,028	1,4	0,61	0,004		0,15	8,18	
Atributos físicos (0-20)								
	Areia			Silte			Argila	
	76.66			12.69			9.65	

pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; M.O.: Matéria orgânica; P: Fósforo; K: Potássio; Na: Sódio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; SB: Soma de bases.

Manejo de irrigação

As lâminas de irrigação foram calculadas tomando como base a evapotranspiração da cultura do sorgo (ET_c), utilizando o método de Penman-Monteith, (Allen et al., 1998) (Equação 1). A irrigação foi realizada diariamente por meio de um sistema de irrigação por gotejamento, com emissores espaçados em 0,20 m, vazão de 1,6 L h⁻¹, pressão de trabalho de 100 kPa e coeficiente de uniformidade de aplicação de 90%.

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (\text{Equação 1})$$

Em que, ET_c = Evapotranspiração da cultura (mm dia⁻¹); ET₀ = Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); K_c = Coeficiente da cultura.

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{1+273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1+0,34 \times u_2)} \quad (\text{Equação 2})$$

em que, ET_0 = evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); R_n = saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G = densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T = temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 = velocidade de vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s = pressão de vapor de saturação (kPa); e_a = pressão parcial de vapor (kPa); Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Os dados climáticos foram monitorados a partir de estações meteorológicas vinculadas ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET – Brasil) e de outra instalada na área experimental, conforme apresentado na Figura 3. Para o ambiente I, os dados foram coletados por uma estação instalada na própria área experimental e ajustados com base nas informações da estação localizada no município de Ipanguaçu-RN. Já para o ambiente II, os dados climáticos foram obtidos a partir da estação meteorológica situada em Mossoró-RN. A ET_0 média observada nos ambientes I e II foi de 6,8 mm e 5,6 mm, respectivamente. Os valores médios de temperatura foram de 28,22 $^{\circ}\text{C}$ e 28,64 $^{\circ}\text{C}$, enquanto a umidade relativa média foi em torno de 58%.

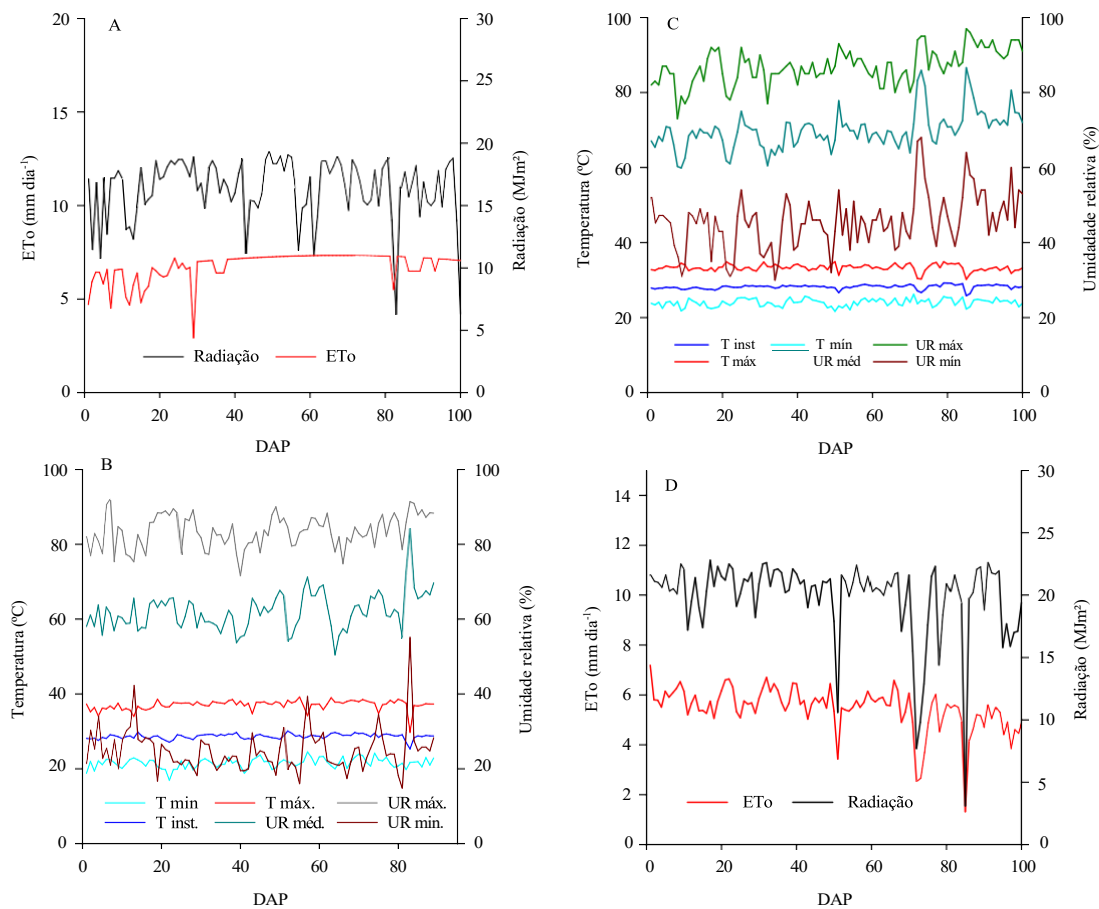


Figura 3. Temperatura máxima, mínima, radiação solar e ET_0 obtidas nos ambientes I (A, B) e II (C, D).

Os valores dos coeficientes de cultivo (K_c) e de resposta da cultura ao déficit hídrico (K_y) foram estimados utilizando o método do K_c duplo para os períodos de condução experimental (Pereira et al., 2025). Dessa forma, adotaram-se valores de K_{cb} basal de 1,0 para a fase III e de 0,7 para o final do ciclo. Por outro lado, o maior valor de K_y foi observado na fase III, correspondendo a 0,35. A Figura 4 ilustra os valores obtidos no ambiente I (A) e no ambiente II (B).

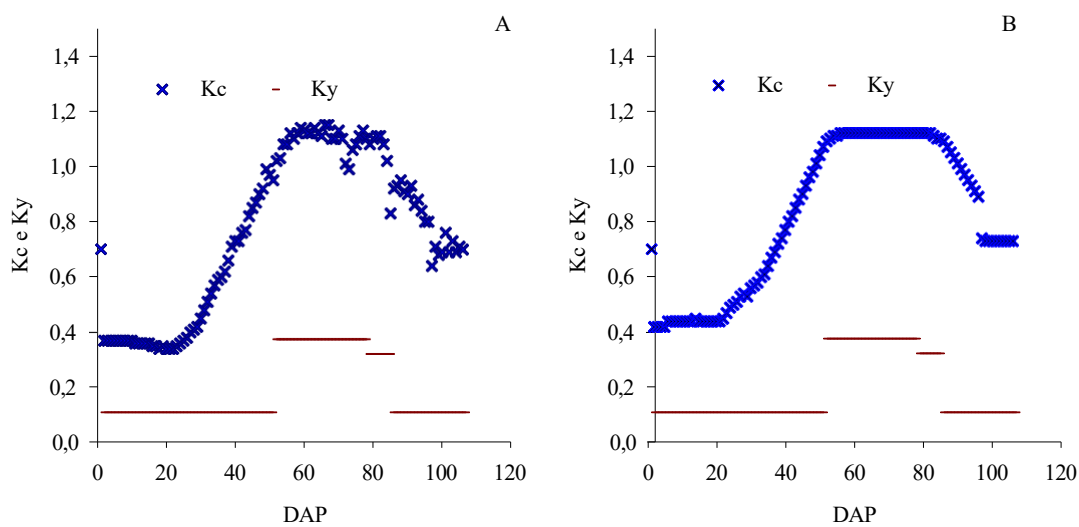


Figura 4. Valores de K_c e K_y obtidos durante a condução experimental nos ambientes I (A) e II(B).

Para a determinação da lâmina de irrigação, adotou-se 100% da evapotranspiração da cultura para os tratamentos sem estresse e 50% para os tratamentos com estresse. As Figuras 5A e 5B apresentam os valores de lâmina de irrigação aplicados ao longo do ciclo da cultura durante a condução experimental no ambiente I, enquanto as Figuras 5C e 5D apresentam os valores de lâminas de irrigação e precipitações acumuladas durante a condução experimental no ambiente II.

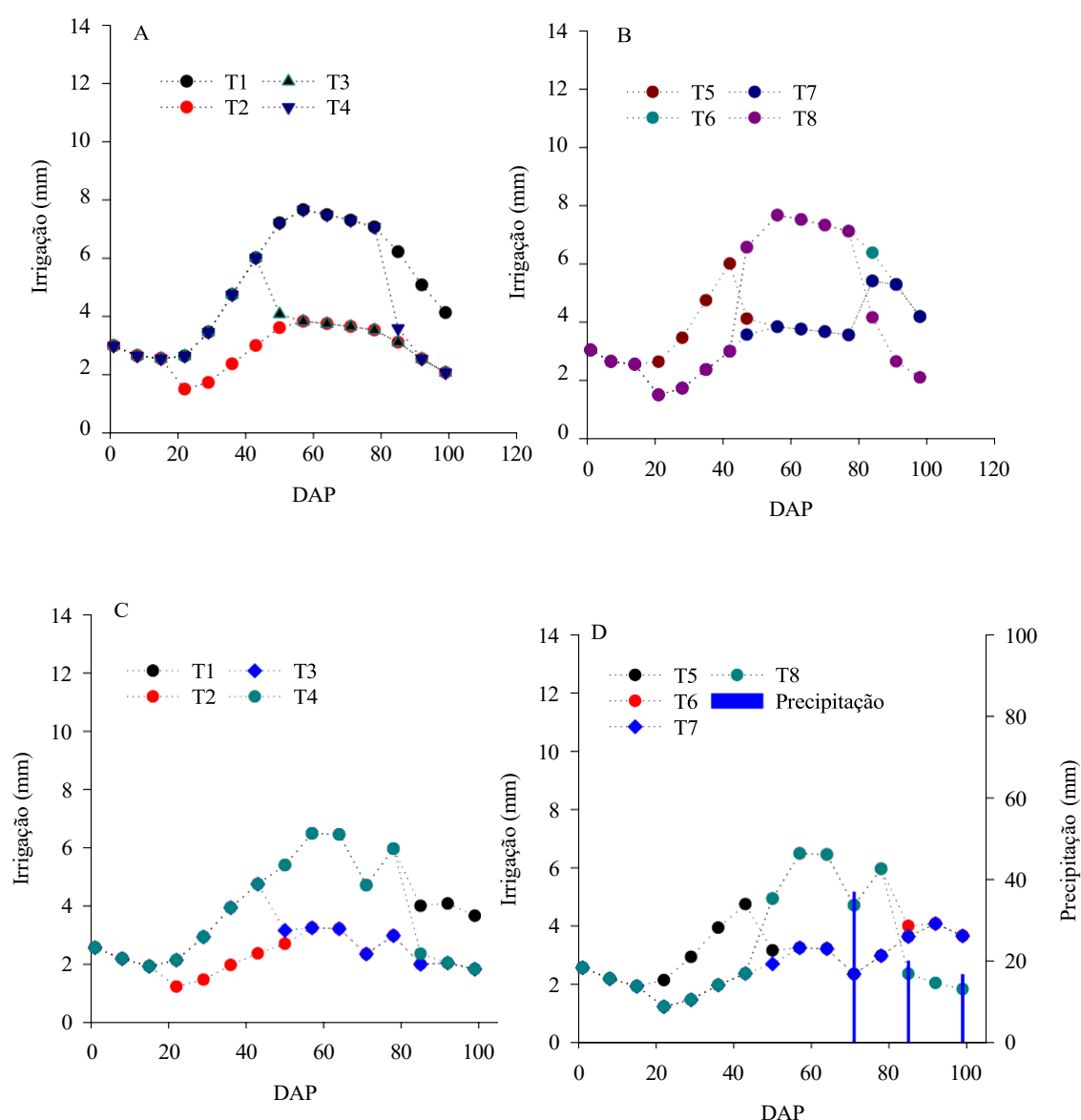


Figura 5. Lâminas de irrigação aplicadas (médias semanais) ao longo do ciclo da cultura do sorgo no ambiente I: 5(A) e 5(B); e no ambiente II: 5(C) e 5(D). T1: 100% da ETc; T2: 100% da ETc na fase I e 50% nas fases II, III e IV; T3: 100% da ETc nas fases I e II e 50% nas fases III e IV; T4: 100% da ETc nas fases I, II e III e 50% na fase IV; T5: 100% da ETc nas fases I, II e IV e 50% na fase III; T6: 100% da ETc nas fases I, III e IV e 50% na fase II; T7: 100% da ETc nas fases I e IV e 50% nas fases II e III; T8: 100% da ETc nas fases I e III e 50% nas fases II e IV.

Tabela 2. Lâmina de irrigação aplicada em cada fase de desenvolvimento do sorgo.

Ambiente I		Tratamento							
Fase	Duração (Dias)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Lâmina aplicada (mm)									
I	21	57,09	57,09	57,09	57,09	57,09	57,09	57,09	57,09
II	28	122,20	61,10	122,20	122,20	122,20	61,10	61,10	61,10
III	35	257,10	128,55	128,55	257,10	128,55	257,10	128,55	257,10
IV	17	85,00	42,50	42,50	42,50	85,00	85,00	85,00	42,50

Total	101	545,78	301,43	362,53	491,08	417,23	484,68	356,13	429,98
Ambiente II		Tratamento							
Fase	Duração (Dias)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Lâmina aplicada (mm)									
I	21	46,88	46,88	46,88	46,88	46,88	46,88	46,88	46,88
II	28	100,51	50,26	100,51	100,51	100,51	50,26	50,26	50,26
III	35	180,95	90,47	90,47	180,95	90,47	180,95	90,47	180,95
IV	22	72,03	36,02	36,02	36,02	72,03	72,03	72,03	36,02
Total	106	400,38	223,63	273,89	364,36	309,90	350,12	259,65	314,10

T1: 100% ETc; T2: 100% ETc na I e 50% na II, III e IV; T3: 100% ETc na I e II e 50% na III e IV; T4: 100% ETc na I, II e III e 50% na IV; T5: 100% ETc na I, II e IV e 50% na III; T6: 100% ETc na I, III e IV e 50% na II; T7: 100% ETc na I e IV e 50% na II e III; T8: 100% ETc na I e III e 50% na II e IV. Ambiente I: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; Ambiente II: Ambiente II da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN.

Foram realizadas análises dos componentes químicos das águas utilizadas em ambos os ambientes, cujos resultados estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3. Condutividade elétrica composição química da água de irrigação utilizada na área experimental nos ambientes I e II.

Ambiente I						
CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
dSm ⁻¹	mmolc L ⁻¹					
1,5	6,3	3,9	6,7	0,09	10,7	6,6
Ambiente II						
CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
dSm ⁻¹	mmolc L ⁻¹					
0,81	3,21	2,59	0,21	0,46	3,8	4,06

CE: condutividade elétrica da água de irrigação; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Ca²⁺: cálcio; Mg²⁺: magnésio; HCO₃⁻: bicarbonatos; Cl⁻: cloretos.

Simulação do rendimento da cultura

Para simular a produtividade da cultura em função da evapotranspiração foi adotada a equação proposta por Stewart et al. (1977):

$$1 - \frac{Y_a}{Y_m} = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right) \quad (\text{Equação 3})$$

em que, ETc = Evapotranspiração da cultura; ETm = Evapotranspiração máxima. Se o valor de ETc for inferior ao ETm, a planta sofrerá estresse, provocando perdas na produção, sendo $Y_a < Y_m$. K_y é o fator de resposta da produtividade.

A produção real da cultura foi determinada através da equação 4:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^4 \left(1 - K_{y_i} \times \left(1 - \frac{ET_{a_i}}{ET_{m_i}} \right) \right) \quad (\text{Equação 4})$$

em que, Y_a = rendimentos reais da cultura (kg ha^{-1}); Y_m = rendimento potencial da cultura (kg ha^{-1}), baseado no rendimento do tratamento controle; K = estágio de crescimento real (Allen et al., 1998); K_{y_i} = fator de resposta do rendimento da cultura por estágio de crescimento (Doorenbos; Kassam, 1979); ET_a e ET_m = evapotranspirações acumuladas da cultura em cada estágio de crescimento k (mm).

Validação da estratégia ótima de irrigação

Para determinar a relação ET_a/ET_m acumulada em cada estágio adotou-se o valor $\tilde{y} = 0,5$, conforme Allen et al. (1998), que assume uma taxa de esgotamento de 0,5 para a cultura do sorgo. Os valores acumulados de $\tilde{y} < 0,5$ foram descartados. Valores diários, anteriores à irrigação, $< 0,5$ não foram descartados.

Não foi adotado o estresse hídrico no primeiro estágio da cultura, sendo utilizada uma equação para considerar os subestágios ($K_c(I)$ e $K_y(I)$) dentro do estágio (Allen et al., 1998).

$$Y_a = Y_m \times \left(1 - K_{y_i} \times \left(1 - \left(\frac{ET_{a_{kc(i)}} + ET_{a_{ky(i)}}}{ET_{m_i}} \right) \right) \right) \times \prod_{k=2}^3 \left(1 - K_{y_k} \times \left(1 - \frac{ET_{a_k}}{ET_{m_k}} \right) \right) \quad (\text{Equação 5})$$

em que, Y_a = rendimento real da cultura (kg ha^{-1}); Y_m = rendimento potencial da cultura (kg ha^{-1}); k = estágio de crescimento atual; K_{y_k} = fator de resposta do rendimento por estágio de crescimento; ET_a e ET_m = evapotranspiração acumulada da cultura em cada estágio de crescimento k (mm).

Para otimizar a taxa de irrigação, foi utilizado o modelo proposto por Dominguez et al. (2012), considerando um cenário em que a diferença máxima entre a evapotranspiração real (ET_a) e a evapotranspiração de referência (ET_m) não ultrapassasse 0,5.

Dados:

$$Y_m = a;$$

$$ET_{mk} = b_k;$$

$$K_{y_k} = C_k;$$

$$\frac{ETa}{ETm} = d;$$

Objetivo:

$$MAX Ya = Ym \prod_{k=1}^4 \left(1 - K_{y_k} \left(1 - \frac{ETa}{ETm}\right)_k\right);$$

Restrições:

$$ETm = \sum_{k=1}^4 ETm_k;$$

$$ETa = \sum_{k=1}^4 ETa_k;$$

$$\left(\frac{ETa}{ETm}\right)_k \leq 1$$

$$\left(\frac{ETa}{ETm}\right)_k \leq 0,5$$

$$\left|\left(\frac{ETa}{ETm}\right)_{k+1} - \left(\frac{ETa}{ETm}\right)_k\right| \leq e;$$

Solução:

$$\left(\frac{ETa}{ETm}\right)_k = f_k;$$

em que; a=produtividade potencial da cultura (Ym) (kg ha⁻¹); b=ETm acumulada em cada estágio *k* de Ky (mm); c=valor de Ky para cada um dos quatro estágios; d=taxa global de ETa/ETm; e=diferença máxima de estresse entre dois estágios Ky consecutivos. Neste caso, e é 0,5; f=taxa de ETa/ETm para cada estágio Ky que permite alcançar a produtividade máxima para uma determinada taxa alvo global de ETa/ETm.

Para a validação do modelo, foram utilizados dados de quatro experimentos conduzidos nos municípios de Mossoró-RN e Upanema-RN, com as cultivares IPA SF-15 e BRS-506. A validação foi realizada por meio da razão entre a produtividade observada e a estimada (Yo/Ya), sendo considerados ajustados os tratamentos cujos valores se situaram no intervalo de $0,90 \leq Yo/Ya \leq 1,10$. Para que os dados fossem considerados ajustados, pelo menos 70% dos valores deveriam atender a esse critério.

Determinação dos graus-dia para a cultura do sorgo

A determinação dos graus dias seguiu a metodologia descrita por Ometto (1981). Adotando cinco condicionantes com as seguintes equações:

$$1) TB > TM > T_m > T_b$$

$$GD = \frac{(TM - T_m)}{2} + T_m - T_b$$

$$2) TB > TM > T_b > T_m$$

$$3) GD = \frac{(TM - T_m)^2}{2 \times (TM - T_m)}$$

$$4) TB > T_b > TM > T_m$$

$$GD=0$$

$$5) TM > TB > T_m > T_b$$

$$GD = \frac{2 \times (TM - T_m) \times (T_m - T_b) \times (TM - T_m)^2 - (TM - TB)}{2 \times (TM - T_m)}$$

$$6) TM > TB > T_b > T_m$$

$$GD = \frac{1}{2} \times \frac{(TM - T_b)^2 - (TM - TB)^2}{(TM - T_m)}$$

em que: GD - graus-dia, °C; TM - temperatura máxima do dia, °C; T_m - temperatura mínima do dia, °C; T_b - temperatura basal inferior, °C; e, TB - temperatura basal superior, °C.

Os valores de temperatura Basal superior e inferior adotados no modelo foram 40 e 11 °C, respectivamente.

Variáveis analisadas

Rendimento de forragem

Ao final do ciclo do sorgo, realizou-se o corte das plantas na área central de cada parcela, considerando-se quatro metros lineares em cada fileira, para a determinação do rendimento de forragem em massa fresca. Em cada fileira, cinco plantas foram selecionadas, separadas em panícula, folhas e colmo, e posteriormente pesadas em balança analítica, a fim de determinar a proporção de cada componente na planta e o teor de massa seca. O rendimento de biomassa seca foi estimado a partir do produto entre a massa fresca obtida nos quatro metros lineares e a proporção de massa seca determinada nas cinco plantas amostradas,

sendo os resultados expressos em Mg ha^{-1} , conforme metodologia descrita por Detmann et al. (2012).

A produtividade da água de irrigação foi calculada como a razão entre a produção de massa fresca (kg ha^{-1}) e a lâmina de irrigação aplicada (mm) (Dominguez et al., 2012).

Análise nutricional

Ao final do ciclo do sorgo, foram determinados os teores de Na, K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn de acordo com a metodologia descrita por Silva (2009). Inicialmente, as folhas foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar a uma temperatura de 65 °C, até atingir peso constante. Após a secagem, o material foi triturado, utilizando um moinho do tipo Willey, obtendo-se as farinhas de tecido. Em seguida, foram pesadas 500 mg de cada amostra, que foram submetidas ao processo de digestão nítrica em micro-ondas. Para isso, o material foi transferido para tubos com tampas rosqueadas contendo 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) e deixados em um forno micro-ondas por 40 minutos. Concluída a digestão, o extrato foi completado com água deionizada até atingir o volume de 25 mL. Posteriormente, foram determinados os teores de Na, K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn em um Espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivo (ICP-MS). Os micronutrientes foram expressos em mg kg^{-1} , enquanto os macronutrientes foram expressos em g kg^{-1} .

A análise dos teores de Nitrogênio seguiu a metodologia descrita por Silva (2009), utilizando amostras com 100 mg da farinha de tecido vegetal, as quais foram transferidas para tubos digestores, adicionando 1 g de mistura de sais ($\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{CuSO}_4$), 3 mL de H_2SO_4 98% e 1 mL de H_2O_2 . Os tubos digestores foram colocados em um bloco digestor, que foi aquecido de forma lenta, até atingir 350 °C. Após a digestão, o extrato foi completado com água deionizada até atingir 50 mL. O extrato foi transferido para o destilador de Kjeldahl. Após a destilação, o teor de nitrogênio foi determinado através da titulação do material destilado, com uma solução de HCl 0,01 mol L^{-1} .

Análise estatística

Os dados foram submetidos às análises de normalidade e homogeneidade de variâncias, pelos testes de Shapiro–Wilk e de Bartlett, respectivamente, adotando-se o nível de significância de 5%.

Após a verificação dos pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância (teste F), considerando-se $p < 0,05$. Quando constatada significância, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Os experimentos foram analisados de forma conjunta e de forma isolada. As análises foram realizadas por meio do software Sisvar (Ferreira, 2011).

RESULTADOS

Validação da estratégia ótima de irrigação

As produtividades simuladas pelo modelo ORDI (Y_a) foram semelhantes às médias reais obtidas durante o experimento (Y_o). O modelo conseguiu simular com precisão os valores obtidos nos tratamentos sem estresse (T1), com estresse nas fases II-III-IV, com estresse apenas na fase IV e com estresse na fase III.

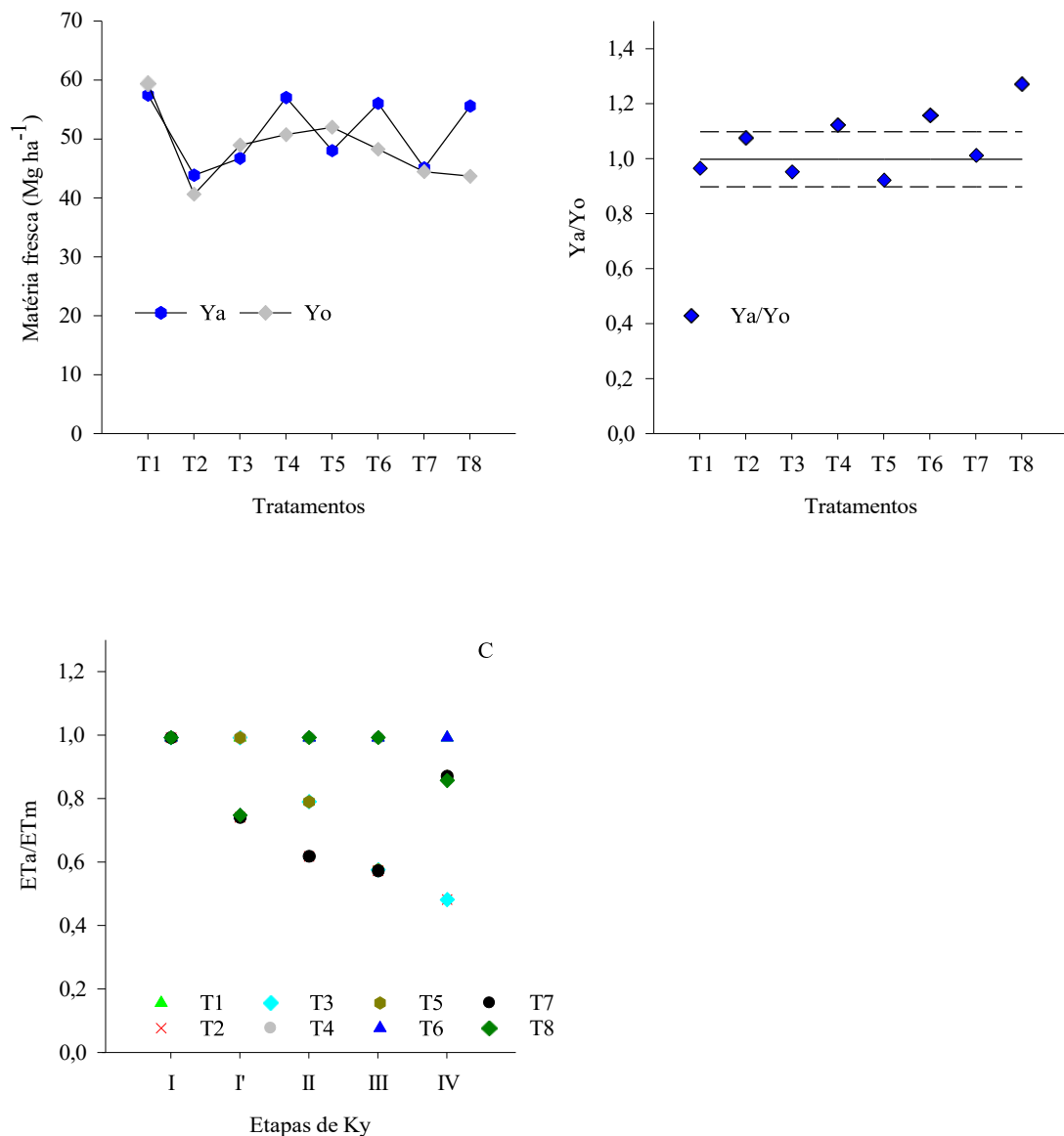


Figura 6. Valores de Yo e Ya (6A), Ya/Yo (6B) e ETa/ETm (6C) a serem alcançadas pelos cronogramas de irrigação dos tratamentos ORDI. T1: 100% Etc; T2:100% Etc na I e 50% na II, III e IV; T3: 100% Etc na I e II e 50% na III e IV; T4: 100% Etc na I, II e III e 50% na IV; T5: 100% Etc na I, II e IV e 50% na III; T6: 100% Etc na I, III e IV e 50% na II; T7:100% Etc na I e IV e 50% na II e III; T8:100% Etc na I e III e 50% na II e IV.

Os valores de Yo para os tratamentos com estresse nas fases II-III-IV; II; II-III e II-IV foram inferiores aos obtidos no tratamento sem estresse (T1) e nos tratamentos com estresse nas fases III-IV; IV e III. Isso indica que déficits hídricos regulados podem ser viáveis para a cultura do sorgo, mas é necessário evitar o estresse durante a fase II ou manter os níveis de estresse abaixo de 50% da ETc.

O modelo conseguiu simular, com diferença inferior a 10%, um total de 60 valores dentre os 85 utilizados na simulação apresentada na Figura 6B, indicando que a estratégia pode ser validada para a cultura do sorgo em ambientes semiáridos.

A Figura 6C apresenta os valores da relação ET_a/ET_m , sendo possível observar uma variação de $0,5 < ET_a/ET_m < 1$. Como o estresse aplicado nos tratamentos deficitários foi de 50%, essa variação encontra-se adequada ao esperado.

As Figuras 7A e 7B mostram a economia de água de irrigação proporcionada por cada tratamento. Observa-se que os tratamentos com estresse hídrico nas fases II-III-IV, estresse nas fases III-IV e estresse nas fases II-III apresentaram economias próximas a 40%, sendo estes resultados promissores para a irrigação em ambientes com restrição hídrica. Por outro lado, o estresse hídrico na fase IV e o estresse hídrico na fase II apresentaram os menores valores de economia de água, com valores em torno de 10 a 15%.

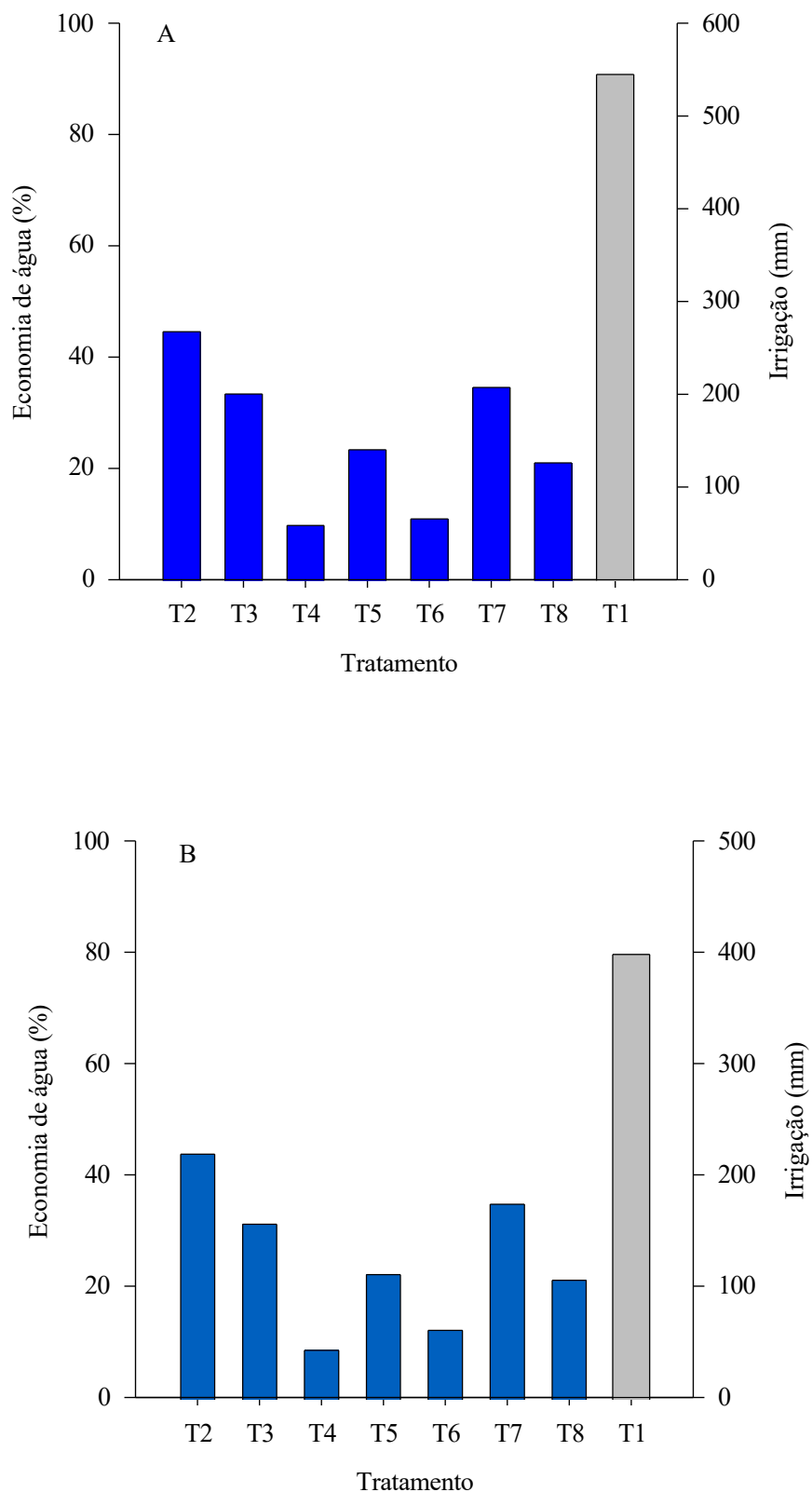


Figura 7. Porcentagem de água de irrigação economizada com a implantação de cada tratamento nos experimentos I (A) e experimento II (B). T1: 100% Etc; T2:100% Etc na I e 50% na II, III e IV; T3: 100% Etc na I e II e 50% na III e IV; T4: 100% Etc na I, II e III e 50% na IV; T5: 100% Etc na I, II e IV e 50% na III; T6: 100% Etc na I, III e IV e 50% na II; T7:100% Etc na I e IV e 50% na II e III; T8:100% Etc na I e III e 50% na II e IV.

Determinação dos graus-dia para a cultura do sorgo

Os valores de graus-dia acumulados para o sorgo completar a maturação fisiológica foram de 1746 °C dia no ambiente I e 1867 °C dia no ambiente II. Ao analisar os graus dias por fase, observou-se que as fases I, II e III apresentaram valores semelhantes entre os ambientes. No entanto, a fase IV apresentou maior variação, com o ambiente I necessitando de 258°C dia e o ambiente II de 378°C dia. Em relação ao período de cultivo, o ambiente II apresentou uma duração média superior em 5 dias ao ambiente I, resultado relacionado às diferenças na duração da fase IV (Tabela 4).

Tabela 4. Valores de Graus-dia (GD) acumulados, Graus-dia (GD) por fase e duração média das fases fenológicas do sorgo biomassa cultivado em dois ambientes distintos.

GD-Acumulado		
Fase	Ambiente I	Ambiente II
I	364	365
II	1002	1003
III	1488	1489
IV	1746	1867
GD-Fase		
Fase	Ambiente I	Ambiente II
I	364	365
II	638	638
III	485	485
IV	258	378
Duração da fase (Dias)		
Fase	Ambiente I	Ambiente II
I	21	21
II	28	28
III	35	35
IV	17	22
Total	101	105

GD: Graus-dia. Ambiente I: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; Ambiente II: Ambiente II da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN.

Rendimento de forragem

De acordo com a análise de variância (Tabela 5), a massa fresca (MF) apresentou efeito significativo para o ambiente, para o estresse hídrico e para a interação ambiente (A) × estresse hídrico (EH), de acordo com o teste F. Por outro lado, a massa seca (MS) foi afetada significativamente apenas pelo estresse hídrico, não sendo observado efeito do ambiente sobre a referida variável.

As variáveis produtividade da água de irrigação e altura de planta (AP) apresentaram efeito significativo tanto para A quanto para EH, no entanto, a interação A × EH não foi

significativa para essas variáveis. O diâmetro do colmo (DC) foi influenciado de forma isolada por A e pela interação A $\times$ EH, não havendo efeito do estresse hídrico.

Tabela 5. Análise de variância do efeito do estresse hídrico em diferentes fases fenológicas sobre o crescimento e a produtividade do sorgo biomassa.

Variável	Fontes de Variação			
	Ambiente (A)	Estresse (E)	A $\times$ E	CV (%)
Massa fresca	20,11 **	10,07 **	4,196*	14,03
Massa seca	0,067 ns	8,808 **	3,26**	18,75
Produtividade da água	13,71 **	6,55 **	2,417*	14,10
Altura da planta	202,58 **	3,76 **	0,316 ns	5,22
Diâmetro do Caule	160,799 **	2,118 ns	3,904 **	8,31

CV – Coeficiente de variação; ns: não significativo ($p > 0.05$); **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$); *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0.05$) pelo teste F.

De forma geral, a massa fresca (M.F), a massa seca (MS), a produtividade da água (PA) e a altura de planta (AP) foram significativamente influenciadas pelo estresse hídrico ($p < 0,05$), conforme apresentado na Tabela 6.

Para a variável M.F, as maiores médias ocorreram no tratamento sem a aplicação do estresse hídrico, com produtividade média de 70,01 Mg ha⁻¹. Entretanto, entre os tratamentos com estresse hídrico, o melhor desempenho foi registrado no tratamento em que o estresse foi aplicado apenas na fase IV, com 58,46 Mg ha⁻¹, evidenciando que a fase IV é a mais apropriada para a redução hídrica.

As menores médias foram obtidas nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV, indicando que o estresse hídrico na fase II é inviável, independentemente do manejo da irrigação adotado.

Em relação à massa seca, as melhores médias foram obtidas quando não houve déficit hídrico. Dentre os tratamentos com aplicação do estresse, as melhores médias foram obtidas nos tratamentos: estresse nas fases III-IV, estresse na fase IV, estresse na fase III e estresse na fase II. As piores médias foram obtidas nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV; tratamentos com estresse nas fases II-III e tratamentos com estresse nas fases II-IV, indicando que o estresse hídrico na fase II somente pode ser aplicado de forma isolada.

P.A apresentou as melhores médias nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV, estresse nas fases III-IV e estresse na fase III, com médias de 183,18; 160,34 e 156,81 kg mm⁻¹, respectivamente.

O estresse hídrico promoveu redução da altura de planta apenas nos tratamentos com estresse na fase II. Em contrapartida, o diâmetro do colmo não foi influenciado significativamente pelo estresse hídrico.

Tabela 6. Efeito do estresse hídrico (médias) em diferentes fases fenológicas na produtividade de massa verde e seca, produtividade da água, altura de planta e diâmetro do colmo do sorgo biomassa, considerando a média dos dois ambientes.

Tratamentos (Fase com déficit)	Variáveis				
	M.F	M.S	P. A	A. P	D.C
T1	70.01 a	21.36 a	123.35 b	3.48 a	22.99 a
2-3-4	45.82 d	12.87 c	183.18 a	3.18 b	20.98 a
3-4	53.96 c	16.23 b	175.25 a	3.40 a	21.93 a
4	58.46 b	16.78 b	139.85 b	3.42 a	21.15 a
3	52,69 c	14.47 b	160.34 a	3.39 a	20.00 a
2	50.61 c	15.09 b	126.33 b	3.24 b	21.05 a
2-3	46.01 d	12.11 c	156.81 a	3.17 b	22.07 a
2-4	45.28 d	12.80 c	125.78 b	3.28 b	22.13 a

MV: Massa Fresca (Mg ha⁻¹); M.S: Massa seca (Mg ha⁻¹); PA: Produtividade da água (kg mm⁻¹); AP: Altura da planta(m); DC: Diâmetro do colmo (mm). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Ao comparar as médias obtidas nos ambientes I e II, é possível visualizar um efeito significativo para as variáveis massa fresca, produtividade da água, altura de planta e diâmetro do colmo ($p < 0,05$), conforme a Tabela 7.

O ambiente I favoreceu melhores incrementos para massa fresca com valor médio de 57,02 Mg ha⁻¹. Em contrapartida, o ambiente II apresentou melhores médias de produtividade da água, altura de planta e diâmetro do colmo. A produção de massa seca foi estatisticamente igual ($p > 0,05$).

Tabela 7. Produtividade de massa verde, massa seca, produtividade da água, altura de planta e diâmetro do colmo do sorgo biomassa sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.

Ambiente	Variáveis				
	M.F	M.S	P. A	A. P	D.C
Ambiente I	57.02 a	15.12 a	140,39 b	3,01 b	18.70 b
Ambiente II	48.70 b	15.31 a	162.20 a	3.63 a	24.38 a

M.F: massa Fresca (Mg ha^{-1}); M.S: massa a seca (Mg ha^{-1}); PA: Produtividade da água (kg mm^{-1}); AP: Altura da planta(m); DC: Diâmetro do colmo (mm). Ambiente I: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; ambiente 2: Ambiente da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

De forma isolada, é possível observar que no ambiente I o estresse hídrico influenciou significativamente a massa fresca, a massa seca, a produtividade da água de irrigação, a altura de planta e o diâmetro do colmo ($p < 0,05$), conforme a Tabela 8.

A variável massa fresca, apresentou as maiores médias no tratamento sem estresse (T1). No comparativo entre os tratamentos com estresse, as maiores produções foram obtidas nos tratamentos com estresse nas fases III-IV; IV e III, com médias de 54,66; 62,78; e 63,51 Mg ha^{-1} . Nessas condições, é possível observar que os estresse na fase III e na fase IV são as estratégias mais viáveis. Os valores de massa seca apresentaram comportamento similar ao da massa fresca. A produtividade da água de irrigação apresentou as menores médias quando o estresse foi no aplicado na fase II, independentemente da combinação e na fase IV.

Em relação à altura de planta, os tratamentos com estresse hídrico na fase II promoveram as menores médias, independentemente do manejo adotado. Por outro lado, o diâmetro do colmo apresentou redução quando submetido ao estresse hídrico.

Referente ao ambiente II, o estresse hídrico influenciou significativamente a massa fresca, a massa seca e a produtividade da água de irrigação ($p < 0,05$), entretanto não foi verificada significância para as variáveis altura de planta e diâmetro do colmo ($p > 0,05$), de acordo com a tabela 8.

As maiores médias de massa seca foram obtidas a partir dos tratamentos sem déficit, déficit nas fases III e IV e déficit na fase IV, com produtividade média de 56,73, 53,24 e 54,14 Mg ha^{-1} , respectivamente. A massa seca apresentou comportamento similar, com as maiores médias sendo obtidas nos tratamentos sem déficit e com déficit nas fases III e IV, indicando que no ambiente II, a adoção de estresse hídrico na fase IV ou nas fases III e IV pode promover rendimento similar ao obtido com irrigação plena. Para a variável produtividade da água de irrigação as maiores médias foram observadas nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV e no estresse nas fases III-IV.

Tabela 8. Média de Produtividade de massa verde e seca, produtividade da água, altura de planta e diâmetro do colmo do Sorgo biomassa sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.

Tratamento	Variáveis (Ambiente I)				
(Fase com déficit)	M.F	M.S	P. A	A. P	D.C
T1	83.28 a	23.27 a	150,47 a	3.21 a	22.21 a
2-3-4	42.82 c	10.94 c	148.09 a	2.85 b	16.64 b
3-4	54.66 b	14.36 c	153,05 a	3.08 a	18.20 b
4	62.78 b	17.73 b	131,12 b	3.16 a	17.99 b
3	63.51 b	17.45 b	161,71 a	3.09 a	17.12 b
2	53.31 c	14.33 c	115,84 b	2.87 b	17.70 b
2-3	49.22 c	11.01 c	138.23 a	2.84 b	20.39 a
2-4	46.55 c	11.87 c	111,43 b	2.98 b	18.98 b

Tratamento	Variáveis (Ambiente II)				
(Fase com déficit)	M.F	M.S	P. A	A. P	D.C
T1	56.73 a	19.45 a	135,11 b	3.76 a	23.36 a
2-3-4	48.81 b	14.80 b	218,28 a	3.51 a	25.32 a
3-4	53.24 a	18.10 a	194,46 a	3.72 a	25.67 a
4	54.14 a	15.83 b	148,59 b	3.69 a	24.32 a
3	41.87 b	11.48 b	158,97 b	3.69 a	22.89 a
2	47.91 b	15.84 b	136,83 b	3.60 a	24.41 a
2-3	42.89 b	13.22 b	165,20 b	3.50 a	23.76 a
2-4	44.02 b	13.74 b	140,13 b	3.58 a	25.28 a

MF: massa Fresca (Mg ha⁻¹); M.S: massa seca (Mg ha⁻¹); PA: Produtividade da água (kg mm⁻¹); AP: Altura da planta(m); DC: Diâmetro do colmo (mm). Ambiente 1: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; ambiente 2: Ambiente da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Análise nutricional

A concentração foliar dos micronutrientes: cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e Zinco (Zn) não foi afetada significativamente pelo estresse hídrico ($p > 0,05$). Em contrapartida, o efeito do ambiente foi significativo para todos os micronutrientes ($p < 0,05$), conforme apresentado na Tabela 9. O estresse hídrico não apresentou significância para a concentração foliar de macronutrientes. Entretanto, o efeito do ambiente foi significativo para todos os macronutrientes ($p < 0,05$), exceto o fósforo (P), que não teve sua concentração foliar afetada significativamente pelo ambiente ($p > 0,05$). A interação A $\times$ E não apresentou significância ($p > 0,05$).

Tabela 9. Análise de variância dos teores nutricionais do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Variáveis	Fontes de variação			
	Ambiente	Estresse	A x E (8)	CV (%)
Cu	8.574 **	0.679 ns	1.284 ns	23.38
Mn	8.311 **	1.010 ns	1.792 ns	23.51

Fe	7.295 **	1.983 ns	0.399 ns	41.97
Zn	14.613 **	0.676 ns	0.971 ns	32.81
Ca	35.150 **	0.123 ns	0.091 ns	78.41
Mg	70.873 **	0.587 ns	0.683 ns	20.62
K	17.530 **	1.086 ns	0.937 ns	53.14
Na	504.673**	1.609 ns	1643 ns	34.30
P	3.096 ns	0.987 ns	1198 ns	21.49
N	6915 *	0.486 ns	1314 ns	36.77

N: nitrogênio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro; Zn: zinco; Na: sódio; P: fósforo; K: potássio. CV – Coeficiente de variação; ns: não significativo ($p > 0.05$); **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$); *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0.05$) pelo teste F.

Micronutrientes

De acordo com o teste de Scott-Knott a 5%, a concentração foliar de micronutrientes não foi afetada pelo estresse hídrico, portanto suas médias são estatisticamente iguais, de acordo com os valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Médias dos teores foliares de micronutrientes do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Tratamento (Fase com déficit)	Variáveis			
	Cu	Mn	Fe	Zn
T1	6,62 a	45.47 a	110.97 a	23.71 a
2-3-4	6.16 a	42.40 a	172.68 a	27.50 a
3-4	6.21 a	46.21 a	124.30 a	27.03 a
4	5.48 a	39.85 a	128.33 a	32.55 a
3	6.72 a	40.12 a	149.01 a	26.35 a
2	6.40 a	51.19 a	118.10 a	27.44 a
2-3	5.87 a	46.22 a	196.54 a	25.52 a
2-4	6.63 a	44.90 a	131.33 a	25.69 a

Cu: cobre (mg kg^{-1}); Mn: manganês (mg kg^{-1}); Fe: ferro (mg kg^{-1}); Zn: zinco (mg kg^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

No comparativo entre os ambientes I e II (Tabela 11), verifica-se que o ambiente I favoreceu a absorção de todos os micronutrientes avaliados, com teores foliares de cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe) e zinco (Zn) de 6,80; 48,32; 161,44 e 31,20 mg kg^{-1} , respectivamente.

Tabela 11. Médias dos teores foliares de micronutrientes do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.

Ambiente	Variáveis			
	Cu	Mn	Fe	Zn
Ambiente I	6.80 a	48.32 a	161.44 a	31.20 a
Ambiente II	5.72 b	40.77 b	121.37 b	22.75 b

Cu: cobre (mg kg⁻¹); Mn: manganês (mg kg⁻¹); Fe: ferro (mg kg⁻¹); Zn: zinco (mg kg⁻¹). Ambiente 1: fazenda Cumaru, Upanema-RN; ambiente 2: Ambiente da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Macronutrientes

Na análise conjunta da absorção foliar de macronutrientes, não foi observada diferença significativa entre as médias obtidas ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Scott-Knott (Tabela 12).

Tabela 12. Médias dos teores foliares de macronutrientes e Sódio do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Tratamento (Fase com déficit)	Variáveis					
	Ca	Mg	K	N	P	Na
T1	12.11 a	4.72 a	17.62 a	9.97 a	2.32 a	3.53 a
2-3-4	10.79 a	5.11 a	24.26 a	10.76 a	2.23 a	2.83 a
3-4	14.60 a	5.04 a	16.96 a	11.11 a	2.22 a	3.18 a
4	11.25 a	4.39 a	15.48 a	9.66 a	2.04 a	2.56 a
3	12.33 a	5.20 a	14.95 a	8.70 a	1.99 a	2.52 a
2	11.48 a	5.00 a	17.69 a	10.71 a	2.51 a	3.10 a
2-3	12.93 a	5.08 a	13.21 a	10.98 a	2.37 a	2.40 a
2-4	12.77 a	4.70 a	15.38 a	11.68 a	2.18 a	2.32 a

Ca: cálcio (g kg⁻¹); Mg: magnésio (g kg⁻¹); Na: sódio (g kg⁻¹); P: fósforo (g kg⁻¹); K: potássio (g kg⁻¹); N: nitrogênio (g kg⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

A Tabela 13 apresenta a comparação entre as concentrações médias de macronutrientes nas folhas do sorgo biomassa nas condições dos ambientes I e II. Os dados demonstram que o ambiente I proporcionou maiores incrementos foliares de cálcio, magnésio, sódio e nitrogênio, com valores médios de 19,42; 3,84; 5,51 e 11,71 g kg⁻¹, respectivamente. Por outro lado, os teores de potássio foram superiores no ambiente II, apresentando valor médio de 21,7 g kg⁻¹. A absorção de fósforo não foi significativamente afetada pelas condições experimentais.

Tabela 13. Médias dos teores foliares de macronutrientes e Sódio do sorgo biomassa submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.

Ambientes	Variáveis					
	Ca	Mg	K	N	P	Na

Ambiente I	19.42 a	3.84 a	12.23 b	11.71 a	2.12 a	5.51 a
Ambiente II	5.14 b	5.97 b	21.66 a	9.18 b	2.34 a	0.10 b

Ca: cálcio (g kg⁻¹); Mg: magnésio (g kg⁻¹); Na: sódio (g kg⁻¹); P: fósforo (g kg⁻¹); K: potássio (g kg⁻¹); N: nitrogênio (g kg⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

O efeito do estresse hídrico sobre a absorção foliar de macronutrientes apresentou padrão de comportamento semelhante nos ambientes I e II (Tabela 14). De modo geral, as médias dos macronutrientes não diferiram estatisticamente entre os tratamentos, havendo significância apenas para a absorção foliar de sódio (Na) no ambiente I. Nesse ambiente, os maiores teores de sódio foram observados nos tratamentos sem estresse, estresse nas fases III-IV; e estresse na fase II, com valores médios de 6,98; 6,26 e 6,12 g kg⁻¹, respectivamente.

Entre as variáveis nutricionais analisadas, o teor de nitrogênio foliar merece destaque, visto que não apresentou variações significativas entre os tratamentos, mesmo sob condições de déficit hídrico. Esse resultado é relevante, considerando que o nitrogênio total é um elemento fundamental, diretamente associado ao conteúdo proteico da forragem.

Tabela 14. Médias dos macronutrientes foliares do sorgo biomassa sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, cultivado em dois ambientes.

Tratamento (Fase com déficit)	Ambiente I					
	Ca	Mg	K	N	P	Na
T1	6.01 a	3.97 a	12.67 a	9.71 a	2.13 a	6.98 a
2-3-4	4.30 a	3.54 a	12.47 a	13.47 a	2.20 a	5.55 b
3-4	5.87 a	3.69 a	12.73 a	12.33 a	2.01 a	6.26 a
4	4.34 a	3.65 a	12.86 a	9.10 a	2.02 a	5.01 b
3	6.16 a	4.18 a	11.33 a	9.27 a	1.72 a	4.93 b
2	5.01 a	4.01 a	12.36 a	14.26 a	2.46 a	6.12 a
2-3	4.63 a	3.85 a	11.36 a	11.11 a	2.67 a	4.69 b
2-4	4.83 a	3.83 a	12.07 a	14.43 a	1.97 a	4.55 b
Tratamento (Fase com déficit)	Ambiente II					
	Ca	Mg	K	N	P	Na
T1	18.21 a	5.47 a	22.57 a	10.23 a	2.50 a	0,09 a
2-3-4	17.29 a	6.68 a	36.06 a	8.05 a	2.44 a	0.11 a
3-4	23.32 a	6.39 a	21.19 a	9.88 a	2.42 a	0.10 a
4	18.17 a	5.14 a	18.11 a	10.23 a	2.07 a	0.11 a
3	18.51 a	6.21 a	18.58 a	8.13 a	2.26 a	0.10 a
2	17.95 a	5.99 a	23.01 a	7.17 a	2.55 a	0.09 a
2-3	21.23 a	6.32 a	15.06 a	10.85 a	2.06 a	0.10 a
2-4	20.71 a	5.57 a	18.70 a	8.92 a	2.39 a	0.10 a

Ca: cálcio (g kg^{-1}); Mg: magnésio (g kg^{-1}); Na: sódio (g kg^{-1}); P: fósforo (g kg^{-1}); K: potássio (g kg^{-1}); N: nitrogênio (g kg^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

DISCUSSÃO

Validação da estratégia ótima de irrigação

Os resultados obtidos com o ajuste do modelo estão de acordo com as recomendações de um manejo adequado da cultura. O déficit hídrico deve ser evitado durante a fase I, pois é fundamental garantir a germinação e o estabelecimento das plântulas (Dominguez et al., 2012).

Durante a fase II, os valores simulados e observados indicam que o manejo hídrico requer maior cuidado, uma vez que é necessário assegurar o suprimento hídrico total ou, na melhor das hipóteses, aplicar apenas estresses leves. A adoção de estresse de 50% ($ETa/ETm = 0,5$) nesse período pode comprometer a produtividade do sorgo, sendo mais viável a aplicação de estresse hídrico nas fases III e IV. A principal vantagem do tratamento sem estresse está relacionada à fase II, uma vez que, segundo Léllis et al. (2017), a manutenção hídrica nos estágios de maior sensibilidade resulta em aumento do rendimento produtivo e da qualidade da colheita. Esses achados corroboram os resultados de Dominguez et al. (2012), que, em estudo com milho, relataram que, para melhorar a adaptação do modelo, é essencial garantir um ótimo desenvolvimento vegetativo, reservando o estresse hídrico para a fase de maturação.

Embora algumas fases respondam melhor que outras, a resposta do sorgo ao estresse hídrico pode variar de acordo com a fase e com o nível de estresse hídrico. Os resultados sugerem que, nas fases mais sensíveis, é possível aplicar déficits mais moderados, e, nas fases mais resistentes, é possível aplicar déficits mais severos, superiores a 50%. Desse modo, as fases I e II necessitam que a relação ETa/ETm esteja próxima de 1, enquanto, nas fases III e IV, os valores podem ficar próximos de 0,5. Esses achados indicam que o manejo de irrigação atrelado à fase fenológica é mais eficiente do que o manejo de estresse tradicional.

Os tratamentos com estresse nas fases III-IV e estresse nas fases II e III resultaram em uma economia de água próxima ao déficit pleno, o que indica que um manejo hídrico nessas fases, especialmente nas fases III-IV, pode manter o rendimento produtivo e reduzir o consumo hídrico em áreas cultivadas com sorgo.

O ambiente II apresentou maior duração do ciclo em comparação ao ambiente I, sendo essa diferença relacionada aos fatores climáticos observados no final do ciclo de cada ambiente. Como a variação entre os ambientes durante as fases I, II e III foi mínima, não houve diferença no acúmulo de graus-dia nessas fases. Entretanto, o término do ciclo no ambiente II ocorreu no início do período chuvoso, o que contribuiu para o aumento da duração total do ciclo.

De acordo com Bezerra et al. (2015), variações na temperatura podem alterar a duração do ciclo das culturas, uma vez que o aumento da temperatura acelera os processos metabólicos da planta, reduzindo o tempo necessário para que ela atinja a maturação fisiológica.

Rendimento de forragem

No presente estudo, verificou-se que o estresse hídrico promoveu reduções na produção de massa fresca e massa seca da cultura do sorgo. No entanto, observou-se que determinadas fases fenológicas apresentam maior potencial para o manejo do déficit hídrico, enquanto outras se mostram mais sensíveis a essa condição.

Os resultados obtidos para as variáveis massa fresca e massa seca corroboram a hipótese de que as fases fenológicas III e IV são as mais resistentes ao estresse hídrico. Em contraste, os tratamentos submetidos ao estresse hídrico nas fases II, III e IV; apenas na fase II; nas fases II e III; e nas fases II e IV apresentaram menores médias de massa fresca e massa seca.

Fadey et al. (2025) relataram que genótipos de sorgo submetidos a estresse hídrico moderado foram capazes de estabilizar a fotossíntese por meio do ajuste osmótico, aumentando a eficiência do uso da água e mantendo níveis satisfatórios de produção de biomassa sob condições de limitação hídrica.

Embora o sorgo seja reconhecido por sua tolerância ao estresse hídrico, determinadas fases do seu ciclo fenológico, especialmente a fase vegetativa e o início do período reprodutivo, apresentam elevada suscetibilidade a esse estresse. Nessas condições, a ausência de água pode resultar em reduções expressivas na produtividade da cultura ou, em cenários mais severos, até mesmo na perda total da lavoura (Menezes et al., 2015). Assim, os resultados obtidos indicam a inviabilidade produtiva da aplicação do estresse hídrico durante

a fase de desenvolvimento vegetativo da cultura do sorgo, uma vez que essa etapa se mostrou altamente sensível à restrição hídrica.

O déficit hídrico aplicado na fase II do sorgo, isoladamente ou em combinação com outras fases, resultou na redução da altura das plantas. Por outro lado, o déficit aplicado nas fases III e IV apresentou valores semelhantes aos obtidos com a irrigação plena. Esses resultados estão diretamente ligados à sensibilidade que a cultura possui durante a fase de desenvolvimento vegetativo.

O estresse hídrico nessa fase pode reduzir a divisão celular e o comprimento dos entrenós. Além disso, afeta a absorção de íons, carboidratos e resulta em plantas com porte reduzido (Fardin et al., 2023). A redução do potencial hídrico em tecidos meristemáticos reduz o potencial de pressão a um nível inferior ao mínimo necessário para o crescimento foliar, afetando, assim, o desenvolvimento de toda a planta (Anjum et al., 2017).

Embora o déficit hídrico reduza a produtividade do sorgo, a cultura ainda pode apresentar níveis satisfatórios de produção de biomassa. Os resultados deste estudo mostraram que, nas fases mais críticas em que houve déficit hídrico, a produtividade da água de irrigação foi a mais alta. Isso indica que, mesmo com uma redução na produtividade total, a diminuição da quantidade de água aplicada pode ser uma estratégia viável para o cultivo de sorgo em regiões semiáridas.

Segundo Ahmed et al. (2025), o sorgo mantém estabilidade produtiva sob restrição hídrica, em grande parte devido ao sistema radicular profundo e denso, que otimiza a absorção de água das camadas mais profundas do solo. A produtividade da água, definida como a relação entre a produção de massa seca e a lâmina de água aplicada, indica que, mesmo quando a restrição hídrica reduz a produção total, a eficiência no uso da água permanece elevada. Esses atributos tornam o sorgo uma cultura estratégica para manejo com déficit hídrico.

As produtividades médias de massa fresca e massa seca foram superiores no ambiente I. Esses resultados estão associados à classificação e às características físicas do solo do local. Enquanto no ambiente I o solo era um Cambissolo de textura franco-argilosa, o solo do ambiente II era um Latossolo de textura areia-franca. As características do solo do ambiente I favorecem maior retenção de água, em razão do maior teor de argila em comparação ao solo

do ambiente II. Dessa forma, mesmo com a aplicação das mesmas lâminas de irrigação, o solo do ambiente I retém maior quantidade de água, o que favorece o desenvolvimento do sorgo.

De acordo com Blum et al. (2017), a textura do solo exerce um papel central nos processos internos do solo, influenciando diretamente a compactação, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes. A proporção de argila, areia e silte determina o tamanho e a distribuição dos poros no solo, o que afeta a área de contato entre o solo e a água, além da capacidade de infiltração. Esses fatores são cruciais para a capacidade de retenção de água, diretamente relacionada à produção de culturas sob condições de estresse hídrico. Nesse sentido, Stone et al. (2025) enfatizam que solos com maior conteúdo de argila tendem a reter mais água e fornecer maior disponibilidade hídrica para as plantas, enquanto solos arenosos apresentam rápida drenagem e menor armazenamento de água disponível, limitando o crescimento vegetal em períodos de déficit hídrico.

A produtividade da água de irrigação foi maior no ambiente II em relação ao ambiente I; essa resposta está diretamente ligada à ocorrência de precipitações pluviais no ambiente II, o que reduziu a lâmina de irrigação aplicada e pode ter proporcionado uma leve recuperação dos tratamentos submetidos ao déficit hídrico, mesmo com a fase IV no ambiente I tendo uma diferença de cinco dias a menos em relação ao ambiente II.

A variação observada entre as respostas obtidas nos ambientes I e II pode ser atribuída à produtividade alcançada no ambiente I sob o tratamento controle. Nesse tratamento, a produtividade de 83 Mg ha⁻¹ superou os demais tratamentos, indicando que, sob condições ótimas de manejo, o sorgo apresenta melhor desempenho em solos argilosos. Esses resultados sugerem que a interação entre práticas de manejo de irrigação e características do solo é determinante para maximizar a produtividade da cultura. Além disso, a diferença no estande final de plantas observada nos ambientes I e II pode ter influenciado o rendimento obtido em ambos os ambientes.

Análises nutricionais

Análise de micronutrientes

A umidade do solo é um fator crucial para a disponibilidade e absorção de micronutrientes pelas plantas. A presença de água influencia diretamente a mobilidade dos íons no solo, permitindo que sejam transportados até as raízes. Quando ocorre estresse

hídrico, essa mobilidade é reduzida, resultando em deficiências nutricionais, mesmo em solos naturalmente férteis (Mahmood et al., 2025).

Em nosso estudo, o estresse hídrico não provocou alterações significativas no teor de micronutrientes nas folhas do sorgo. Esse resultado sugere que o déficit de água aplicado não foi suficiente para comprometer a absorção de nutrientes, possivelmente porque a quantidade residual de água no solo ainda permitiu o transporte eficiente dos íons até a zona radicular da planta.

Cunha et al. (2024) relataram que, mesmo sob estresse hídrico de 50% da ETc, não houve efeito significativo na absorção de micronutrientes por diferentes cultivares de sorgo. Esses registros sugerem que, em níveis moderados de restrição hídrica, o sorgo pode manter a absorção de nutrientes essenciais para o crescimento e a produção.

Ao comparar os micronutrientes absorvidos nos ambientes I e II, verificou-se que as condições do solo no ambiente I favoreceram uma maior absorção de micronutrientes. Esse efeito está associado às características físico-químicas de cada local, uma vez que, embora o ambiente I tenha apresentado maiores médias de absorção, o comportamento individual dos micronutrientes foi semelhante em ambos os ambientes.

De acordo com Xu et al. (2025), o teor de micronutrientes no solo é influenciado pelo material de origem, pelos fatores de formação do solo e pelas propriedades físico-químicas de cada local. Além disso, o tipo de solo e o material de origem podem ser considerados os principais determinantes da disponibilidade de micronutrientes em um solo (Liu et al. 2021).

Os teores de Cu, Mn, Fe e Zn, embora não tenham sido significativamente influenciados pelo estresse hídrico, apresentaram valores próximos aos níveis ideais descritos por Martínez et al. (1999) para a cultura do sorgo. Apesar de o cobre ter ficado ligeiramente abaixo do limite inferior recomendado (10 mg dm^{-3}), os valores nutricionais permanecem dentro da faixa adequada.

Análise de macronutrientes

A reposição hídrica adequada estimula os processos de absorção de macronutrientes e micronutrientes, enquanto o déficit hídrico pode induzir deficiências nutricionais e causar danos biológicos nas plantas (Teixeira et al., 2024). No entanto, no presente estudo, o déficit

hídrico aplicado em diferentes fases fenológicas não apresentou efeito significativo sobre a absorção dos principais macronutrientes.

A absorção de macronutrientes apresentou diferenças significativas entre as médias obtidas em cada ambiente. As condições no ambiente I favoreceram a absorção de cálcio, magnésio, sódio e nitrogênio, enquanto o ambiente II favoreceu a absorção de potássio. A maior absorção de cálcio, magnésio, nitrogênio e sódio no ambiente I está diretamente relacionada às características do solo e da água utilizada, sendo que esta apresentava uma condutividade elétrica (CE) de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$, enquanto a água no ambiente II possuía CE de $0,85 \text{ dS m}^{-1}$. Por outro lado, a maior absorção de potássio no ambiente II está associada à menor concentração de sódio na água, uma vez que sódio e potássio competem pelos mesmos sítios de absorção, e o teor elevado de sódio no ambiente I exerceu efeito negativo sobre a absorção de potássio.

Mohammad et al. (2024) relataram que, com o aumento nos teores de sódio, ocorre uma diminuição na absorção de potássio, prejudicando a relação K^+/Na^+ e podendo causar extravasamento de íons nas membranas celulares dos tecidos vegetais.

Em ambos os ambientes, os teores foliares de K e P apresentaram valores semelhantes aos observados por Silva et al. (2023) no estudo com a cultivar IPA SF-15, que registrou absorções médias de aproximadamente 14 g kg^{-1} para K e 2 g kg^{-1} para P.

Os teores de macronutrientes observados nos ambientes I e II encontram-se dentro da faixa ideal relatada por Martinez et al. (1999). A única exceção foi o teor de Ca no ambiente II, que apresentou valores ligeiramente superiores ao limite máximo de $8,6 \text{ g kg}^{-1}$ estabelecido pelo autor.

CONCLUSÃO

O déficit hídrico aplicado nas fases III e IV pode ser uma estratégia eficiente para reduzir o consumo de água sem comprometer a produtividade do sorgo biomassa. A fase II apresenta menor tolerância ao estresse hídrico, enquanto as fases III e IV demonstram maior tolerância. Assim, a aplicação do estresse hídrico nas fases mais tolerantes constitui uma alternativa viável para otimizar a produtividade em áreas com restrição de recursos hídricos. Entretanto, o estresse hídrico não afeta a absorção de nutrientes pelo sorgo biomassa.

O modelo ORDI pode ser utilizado no manejo hídrico do sorgo em ambientes semiáridos, configurando-se como uma importante ferramenta para otimizar o uso dos recursos hídricos em regiões de escassez de água. Recomenda-se, ainda, o ajuste do modelo para outras culturas de importância agrícola, visando aumentar a produtividade em zonas semiáridas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, U., Iqbal, W., Amin, H., Noor, E., Jamal, A., Saeed, M. F., & Černý, J. (2025). Desempenho comparativo de cereais de verão sob condições de disponibilidade limitada de água e fertilizantes. *Discover Agriculture*, 3(1), 116. <https://doi.org/10.1007/s42540-025-00024-0>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). FAO.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., ... Nazir, U. (2017). Growth and development responses of crop plants under drought stress: A review. *Environmental and Experimental Botany*, 144, 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.07.009>
- Bezerra, S. A. F.; Silva, T. G. F.; Souza, L. S. B.; Moura, M. S. B.; Morais, J. E. F.; Diniz, W. J. S.; Queiroz, M. G. Demanda hídrica bruta da Palma Forrageira em cenários futuros de mudanças climáticas no Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 8, p. 1628-1643, 2015.
- Blum, W. E., Schad, P., & Nortcliff, S. (2017). *Essentials of Soil Science: Soil formation, functions, use and classification (World Reference Base, WRB)*. Gebr. Borntraeger Science Publishers.
- Cunha, T. L. D. O., Santana, D. C., Theodoro, G. D. F., Seron, A. C. D. S. C., Cunha, F. F. D., Teodoro, P. E., ... Montañó, A. S. (2024). Effect of water deficit on secondary metabolites and nutrient content on forage sorghum. *Agronomy*, 14(9), 2046. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092046>
- Domínguez, A., De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Martínez, R. S., & Martínez-Romero, A. (2012). Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 67–77a. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.003>
- Doorenbos, J., Plusje, J. M. G. A., Kassam, A. H., Branscheid, V., & Bentvelsen, C. L. M. (1986). *Yield response to water* (Vol. 192). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Fadeyi, O. J., Fabunmi, T. O., Idowu, V., Olowe, O., & Adejuyigbe, C. O. (2025). Respostas agronômicas de variedades selecionadas de sorgo melhorado [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] ao estresse hídrico programado. *Discover Agriculture*, 3(1), 230. <https://doi.org/10.1007/s42540-025-00030-2>
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: Um sistema computacional de análise estatística. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039–1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>
- Fardin, F., Sani, B., Moaveni, P., Afsharmanesh, G., & Mozafari, H. (2023). Valor nutricional e características agronômicas do sorgo forrageiro sob estresse hídrico. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 48, 102624. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102624>
- Léllis, B. C., Carvalho, D. F., Martínez-Romero, A., Tarjuelo, J. M., & Domínguez, A. (2017). Effective management of irrigation water for carrot under constant and optimized regulated deficit irrigation in Brazil. *Agricultural Water Management*, 192, 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.08.018>
- Lira, R. B., Ferreira-Neto, M., da Silva Dias, N., de Medeiros, J. F., de Brito, R. F., de Lemos, M., ... da Silva Sá, F. V. (2023). Biomass, grain yield, ethanol production, and energy cogeneration of sweet sorghum irrigated with domestic sewage effluent. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(10), 9131–9140. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-08500-4>
- Liu, Y., Tian, X., Liu, R., Liu, S., & Zuza, A. V. (2021). Principais fatores determinantes do solo enriquecido com selênio no cinturão geológico de baixo teor de Se: Um estudo de caso nos Leitos Vermelhos da Bacia de Sichuan, China. *Catena*, 196, 104926. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104926>
- Mahmood, M., Wang, J., Mehmood, S., Ahmed, W., Ayyoub, A., Seleiman, M. F., ... Li, W. (2025). Influence of drought stress on phosphorus dynamics and maize growth in tropical ecosystems. *BMC Plant Biology*, 25(1), 62. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-00062-0>
- Marcelino, R. M. O. da S., Morais, F. M. da S., Ferreira, F. N., Alves, L. de S., Moura, E. L., Melo, A. K. de S., ... Pessoa, A. M. dos S. (2025). *Salicylic acid mitigates damage caused by water deficit in forage sorghum*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Agriambi)*, 29(3), e286824. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n3e286824>
- Martinez, H. E. P., Carvalho, J. G. de, & Souza, R. B. de. (1999). Diagnose foliar. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, & V. V. H. Alvarez (Eds.), *Recomendação para uso de*

corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação (pp. 143–168). Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais.

Martínez-Romero, R., Domínguez, J., & Carvalho, S. (2017). Optimization of regulated deficit irrigation for carrot using ORDI model. *Agricultural Water Management*, 189, 12–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.03.015>

Mohammadi, H., Abdollahi-Bastam, S., Aghaei, A., & Ghorbanpour, M. (2024). Foliar-applied silicate potassium modulates growth, phytochemical, and physiological traits in *Cichorium intybus* L. under salinity stress. *BMC Plant Biology*, 24(1), 288. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-0288-0>

Ometto, J. C. Bioclimatologia vegetal. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.

Pinheiro, A. G., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., & Silva, T. G. F. (2021). Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira – Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(4), 2403–2426. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2403-2426>

Silva RR, De Medeiros JF, De Queiroz GC, De Sousa LV, De Souza MVP, De Almeida Bastos Do Nascimento M, et al. Resposta iônica e produção de sorgo sob estresse hídrico e salino em ambiente semiárido. *Agricultura*. 2023;13(6):1127. doi: [10.3390/agricultura13061127](https://doi.org/10.3390/agricultura13061127) .

Silva, F. C. (2009). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*.

Stone, L. F., de Melo Carvalho, M. T., da Silva, M. A. S., Calil, F. N., de Britto Siqueira, M. M., Moura, T. M., ... Madari, B. E. (2025). As propriedades intrínsecas do solo moldam a disponibilidade de água sob mudanças no uso da terra em texturas contrastantes do solo. *Soil Advances*, 100082. <https://doi.org/10.1016/j.soiladv.2025.100082>

Wahyuni, Y., Miyamoto, T., Hartati, H., Widjayantie, D., Windiastri, V. E., Sulistyowati, Y., ... Umezawa, T. (2019). Variation in lignocellulose characteristics of 30 Indonesian sorghum (*Sorghum bicolor*) accessions. *Industrial Crops and Products*, 142, 111840. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111840>

Wani, S. P., Albrizio, R., & Vajja, N. R. (2012). Sorghum. In *Crop Yield Response to Water* (FAO Irrigation and Drainage Paper 66, pp. 144–151). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Xu, Z., Zhou, Y., Liu, R., Cui, H., Tan, J., Zhou, W., & Ouyang, K. (2025). Available medium and micronutrients in the soils of major citrus-producing areas in Southeast China. *Journal of Environmental Management*, 389, 126078. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126078>

Yemm, E. W., & Willis, A. J. (1954). The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical Journal*, 57, 508–514. <https://doi.org/10.1042/bj0570508>

Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

FAO & UN-Water. Progress on the level of water stress – Mid-term status of SDG Indicator 6.4.2 and acceleration needs, with special focus on food security - 2024. Rome: FAO. 2024. 82p. <https://doi.org/10.4060/cd2179en>

3. CAPÍTULO 3. PRODUTIVIDADE DE BIOMASSA E ETANOL DO SORGO SACARINO SOB ESTRESSE HÍDRICO EM DIFERENTES FASES FENOLÓGICAS

RESUMO

O presente estudo avaliou o efeito do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas sobre a produção de biomassa e etanol do sorgo sacarino. Foram conduzidos dois experimentos nos municípios de Upanema-RN e Mossoró-RN, em solos Cambissolo Háplico e Latossolo Vermelho-Amarelo, respectivamente. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, com oito tratamentos: T1: sem estresse; T2: estresse nas fases II, III e IV; T3: estresse nas fases III e IV; T4: estresse na fase IV; T5: estresse na fase III; T6: estresse na fase II; T7: estresse nas fases II e III; e T8: estresse na fase II e IV com quatro repetições, utilizando a cultivar BRS 506. O estresse foi aplicado de acordo com a estimativa da evapotranspiração máxima da cultura, utilizando 100% nos tratamentos sem estresse e 50% para os tratamentos com estresse, adotando valores de K_{cbIII} e K_{cbF} de 1,00 e 0,70, respectivamente. Foram avaliados produtividade de massa fresca e de massa seca, em $Mg\ ha^{-1}$, produtividade e qualidade de caldo e a avaliação nutricional da folha. O déficit hídrico influenciou significativamente a produtividade de massa fresca e seca do sorgo, sendo os menores incrementos de massa fresca encontrados nos tratamentos estresse nas fases II-III-IV, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV com produtividades médias de 35, 39 e 39 $Mg\ ha^{-1}$, respectivamente. De forma geral, o déficit hídrico não afetou a absorção de nutrientes e qualidade do caldo. A aplicação de déficit hídrico em diferentes fases fenológicas promove uma redução na produção de massa fresca do sorgo sacarino, sendo a fase II a menos tolerante ao déficit hídrico e a fase III a mais tolerante. A aplicação de estresse na fase IV se mostra uma alternativa viável, pois permite manter a produtividade ao mesmo tempo em que reduz o consumo de água.

Palavras-chave: Biocombustível; déficit hídrico; forragem; *sorghum bicolor*.

CHAPTER 3. BIOMASS AND ETHANOL PRODUCTIVITY OF SWEET SORGHUM UNDER WATER STRESS AT DIFFERENT PHENOLOGICAL STAGES

ABSTRACT

The present study evaluated the effect of water deficit at different phenological stages on biomass and ethanol production of sweet sorghum. Two experiments were conducted in the municipalities of Upanema, Rio Grande do Norte, Brazil, and Mossoró, Rio Grande do Norte, Brazil, on a Haplic Cambisol and a Red-Yellow Latosol soils, respectively. A randomized block design was used, with eight treatments: T1 (no stress); T2 (stress during stages II, III, and IV); T3 (stress during stages III and IV); T4 (stress during stage IV); T5 (stress during stage III); T6 (stress during stage II); T7 (stress during stages II and III); and T8 (stress during stages II and IV), with four replications, using the BRS 506 cultivar. Water stress was applied based on the estimated maximum crop evapotranspiration, using 100% in non-stress treatments and 50% for the stress treatments, adopting KcbIII and KcbF values of 1.00 and 0.70, respectively. Fresh and dry biomass yields (Mg ha^{-1}), juice yield and quality, and leaf nutritional status were evaluated. Water deficit significantly affected fresh and dry biomass yield of sorghum, with the lowest fresh biomass increments observed in the treatments with stress during stages II-III-IV, II-III, and II-IV, with mean yields of 35, 39, and 39 Mg ha^{-1} , respectively. Overall, water deficit did not affect nutrient uptake or juice quality. The application of water deficit at different phenological stages reduced fresh biomass production of sweet sorghum, with stage II being the least tolerant to water deficit and stage III the most tolerant. The application of stress during stage IV appears to be a viable alternative, as it allows maintaining productivity at the same time as reducing water consumption.

Keywords: Biofuel; water deficit; forage; *Sorghum bicolor*.

INTRODUÇÃO

A rápida expansão demográfica, aliada à degradação dos recursos naturais, tem gerado uma pressão crescente sobre os recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas (Shahadha et al., 2026). Nesse cenário, torna-se imprescindível investir em fontes de energia limpa e renovável, adotar práticas agrícolas sustentáveis e buscar alternativas para reduzir o consumo hídrico, mantendo a produtividade e o rendimento econômico. A implementação de soluções inovadoras é fundamental para garantir um equilíbrio entre o uso dos recursos e a preservação ambiental, assegurando a sustentabilidade a longo prazo dessas áreas vulneráveis.

Dentre as práticas agrícolas que se destacam no contexto de regiões semiáridas, o cultivo do sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* L.) se mostra uma alternativa promissora. Adaptado às condições de clima semiárido, plantão sorgo possui múltiplas utilidades, tais como a produção de forragem, alimento humano e, principalmente, biocombustível (Naura et al., 2020). Segundo Aydinsakir et al. (2021), o sorgo tem a capacidade de gerar elevados rendimentos de etanol por unidade de área, além de ser uma das poucas espécies que combinam a produção de alimentos e biocombustíveis de forma eficiente.

Nesse contexto, sobressai a cultivar BRS 506, desenvolvida pela Embrapa, que pode produzir mais de 20 Mg de caldo por hectare e alcançar produtividade superior a 3.000 L ha⁻¹ de etanol. Além disso, sua versatilidade produtiva, aliada à baixa demanda hídrica, torna o sorgo uma alternativa estratégica para sistemas agrícolas sustentáveis, especialmente em regiões sujeitas à escassez de água (Lira et al., 2023).

Embora o sorgo sacarino seja uma cultura conhecida por suas características de resistência ao estresse hídrico, estudos indicam que, sob níveis mais severos de escassez de água, a planta pode sofrer impactos negativos em sua produtividade. O estresse hídrico excessivo pode resultar em reduções na produção de biomassa, grãos e etanol, comprometendo o desempenho da cultura (Lino et al., 2023). Esse fator é crucial na implementação do sorgo como uma solução para a sustentabilidade agrícola em regiões semiáridas.

Além disso, a resistência do sorgo ao estresse hídrico pode variar conforme a fase fenológica em que o estresse é aplicado. Hsiao et al. (1976) observaram que, quando o sorgo é exposto ao estresse hídrico durante a fase de florescimento, ocorre a morte da panícula, o que faz com que a planta emita novos perfilhos na tentativa de minimizar os efeitos sobre a

produção de grãos. Ademais, dependendo da fase e da intensidade do estresse, pode ocorrer redução na altura da planta ou até o murchamento, que, dependendo da severidade, pode ser irreversível (Amaral et al., 2003; Boomiraj et al., 2011).

Nesse contexto, o uso do déficit hídrico em diferentes fases fenológicas pode ser uma alternativa para identificar as fases mais tolerantes e otimizar o uso dos recursos hídricos na cultura do sorgo sacarino. Assim, objetivou-se avaliar o efeito do estresse hídrico em diferentes fases fenológicas sobre a produção de biomassa, a nutrição e a produção de etanol do sorgo sacarino cultivado em ambiente semiárido.

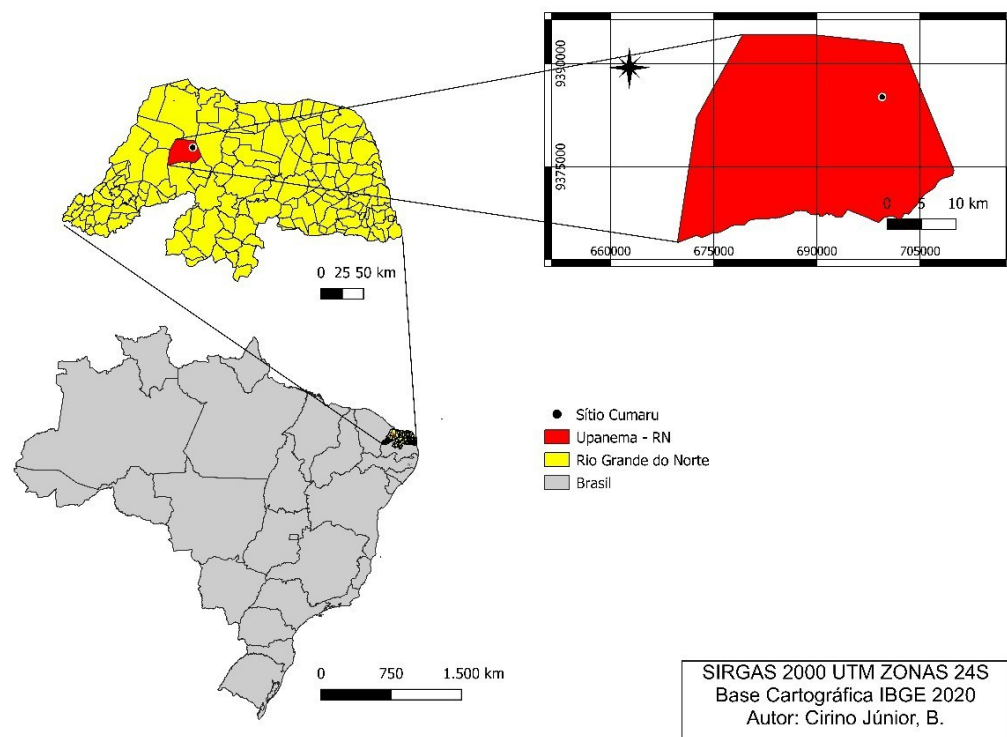
MATERIAL E MÉTODOS

Localização dos experimentos I e II e clima

A condução experimental foi realizada em dois ambientes distintos, denominados ambiente I e ambiente II. O experimento do ambiente I foi instalado na área experimental do Sítio Cumaru, no município de Upanema-RN, cujas coordenadas geográficas são 5° 33' 30" S e 37° 11' 56" O, com altitude média de 110 m (Figura 1a), onde predomina o Cambissolo Háplico, apresentando textura franco-argilosa (Santos et al., 2025).

Por outro lado, o experimento do ambiente II foi instalado na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, localizada no município de Mossoró-RN, nas coordenadas geográficas 5° 12' 48" S de latitude e 37° 18' 44" W de longitude, com altitude média de 37 m (Figura 1b), onde ocorre um Latossolo Vermelho-Amarelo (Santos et al., 2025), apresentando textura areia-franca. Em ambas as áreas, predomina o clima tropical semiárido quente e seco (BSh), de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al. 2013).

A



B

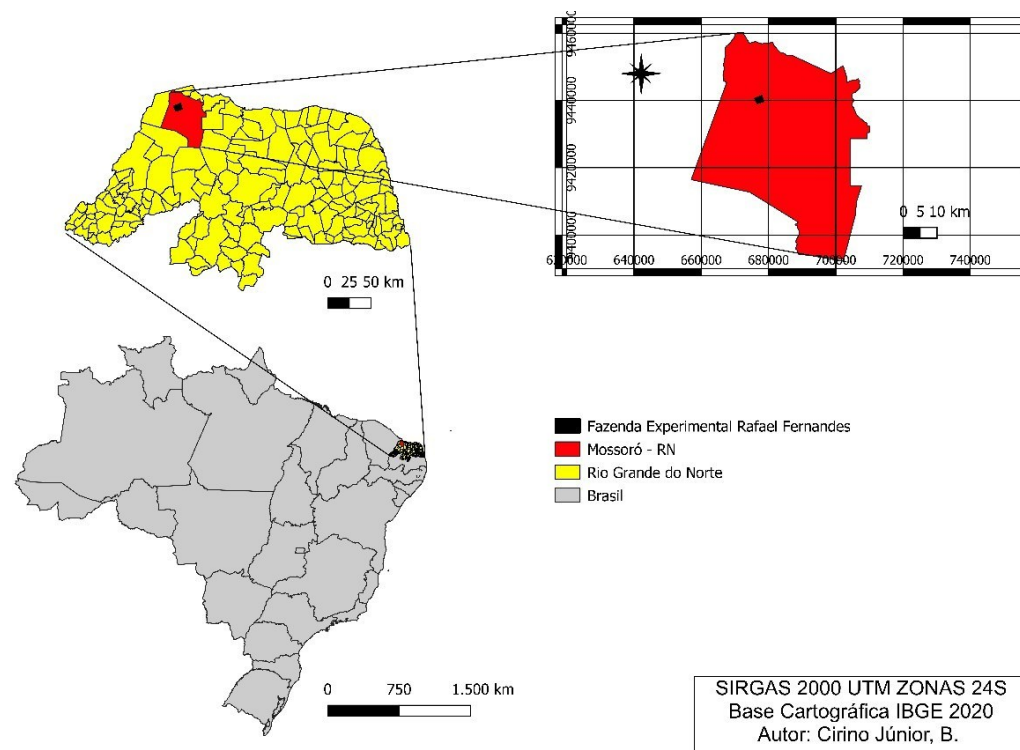


Figura 1. Mapas da localização dos ambientes I (A) e II (B).

0

1

Delineamento experimental e material vegetal

Os experimentos foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados, com oito tratamentos (T1: sem estresse; T2: estresse nas fases II, III e IV; T3: estresse nas fases III e IV; T4: estresse na fase IV; T5: estresse na fase III; T6: estresse na fase II; T7: estresse nas fases II e III; T8: estresse nas fases II e IV) e quatro blocos, resultando em 32 parcelas em cada ambiente. A cultivar de sorgo utilizada foi a BRS-506, com aptidão para a produção de forragem e de etanol.

Preparo da área e manutenção do experimento

Para a implantação do experimento, realizou-se a aração e a gradagem da área experimental oito dias antes da semeadura. A semeadura do sorgo foi realizada manualmente, adotando-se o sistema de cultivo em fileiras duplas, com espaçamento de $1,3 \times 0,3$ m. Após a emergência das plântulas, efetuou-se o desbaste, estabelecendo-se uma população de 20 plantas por metro linear.

Aos 15 dias após a emergência das plântulas, realizou-se a primeira capina da área, atividade que passou a ser realizada de forma contínua, a fim de evitar a incidência de plantas daninhas. O controle de pragas foi efetuado manualmente, por meio de um pulverizador costal com capacidade para 20 litros, utilizando-se os inseticidas Decis (Deltrametrina) e Evidence (Imidacloprido), para controle de lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*) e pulgão-amarelo-da-cana-de-açúcar (*Melanaphis sacchari*).

Aplicação da lâmina de irrigação

A lâmina de irrigação plena foi determinada pelo método de Penman-Monteith, com base no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0), conforme Allen et al. (1998), apresentada na Equação 1.

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (\text{Equação 1})$$

em que, ET_c = Evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ET_0 = Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); K_c = Coeficiente da cultura.

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)} \quad (\text{Equação 2})$$

em que, ET_0 = evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); R_n = saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G = densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T = temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$); u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s = pressão de vapor de saturação (kPa); e_a = pressão parcial de vapor (kPa); Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Os coeficientes de cultivo (K_c) foram estimados pelo método do K_c duplo (Allen et al., 2006) para os períodos de condução experimental, considerando os K_{cb} 's basais para a fase III e para o final do ciclo de 1,0 e 0,7, ajustando as condições climáticas, ao sistema e ao manejo da irrigação. A Figura 3 ilustra os valores de K_c estimados nos experimentos I (A) e II (B).

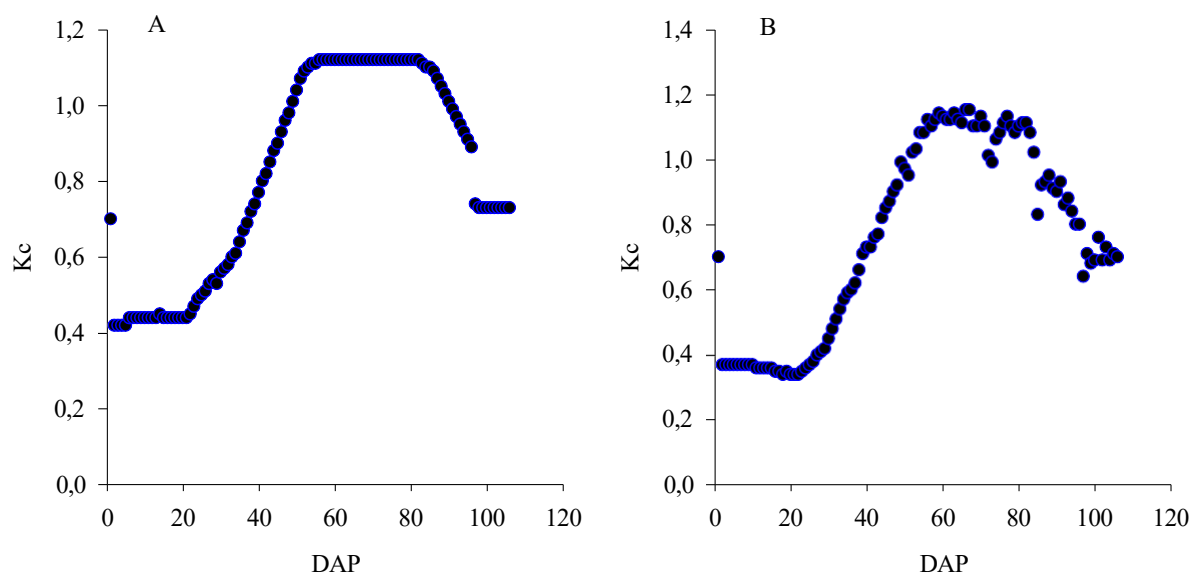
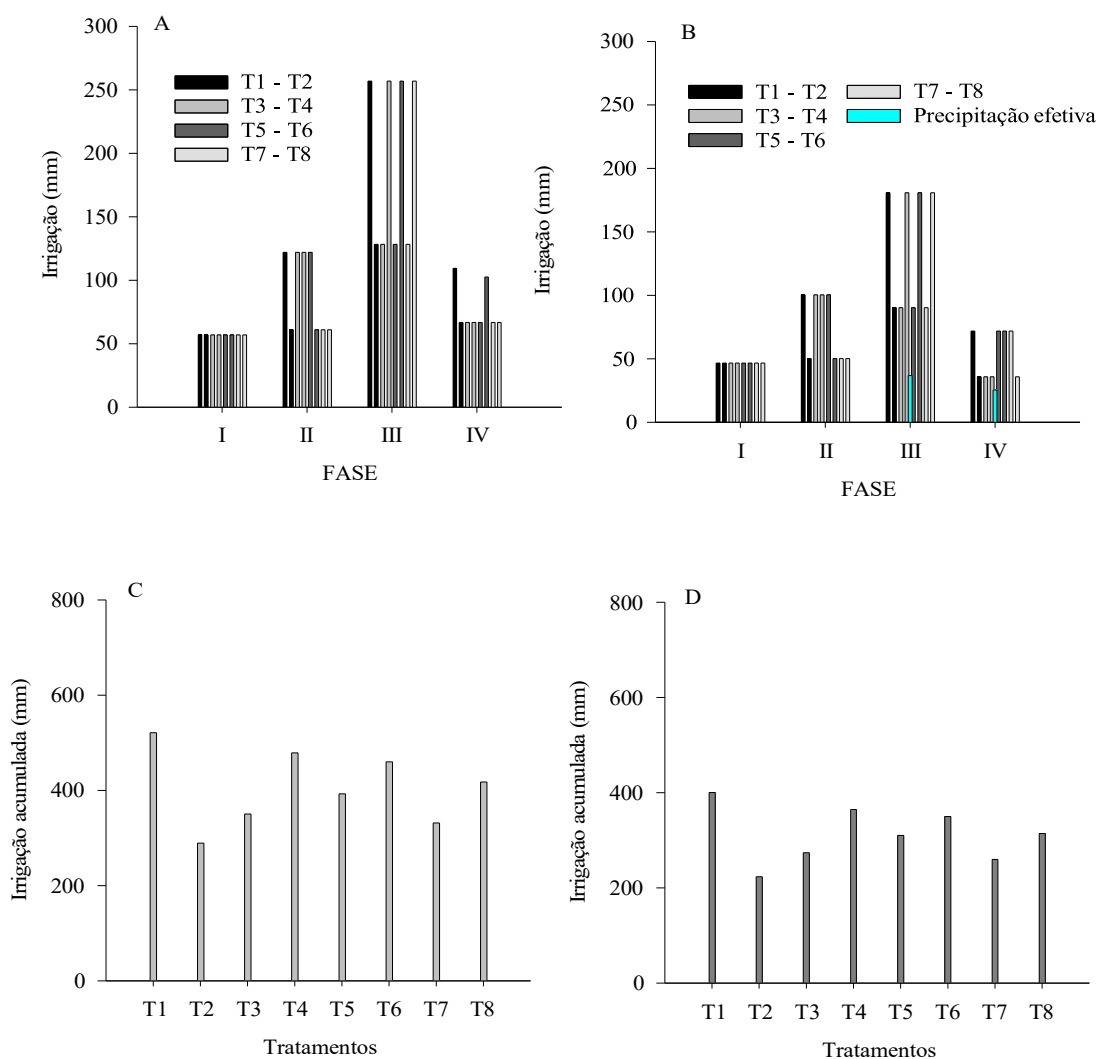


Figura 2. Valores de K_c obtidos durante a condução experimental nos ambientes I (A) e II(B).

Para os tratamentos sem aplicação de estresse, adotou-se a lâmina de irrigação correspondente a 100% da evapotranspiração da cultura (ET_c), considerando uma eficiência de aplicação de 90%. Entretanto, nos tratamentos com aplicação de estresse, utilizou-se a lâmina líquida correspondente a 50% da ET_c .

As Figuras 3A e 3C apresentam os valores de lâmina de irrigação por fase e o total acumulado ao final do ciclo da cultura no ambiente I, enquanto as Figuras 3B e 3D mostram os mesmos parâmetros para o ambiente II.



A irrigação foi realizada diariamente, utilizando águas provenientes de poços tubulares. A Tabela 1 apresenta a caracterização química das águas empregadas nos ambientes I e II.

Tabela 1. Condutividade elétrica composição química da água de irrigação.

Ambiente I						
CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
dSm ⁻¹	mmol _c L ⁻¹					
1,5	6,3	3,9	6,7	0,09	10,7	6,6

Ambiente II						
CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
dSm ⁻¹	-----mmol _e L ⁻¹ -----					
0,81	3,2	2,6	2,1	0,46	3,8	4,1

CE: condutividade elétrica da água de irrigação; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Ca²⁺: cálcio; Mg²⁺: magnésio; HCO₃⁻: bicarbonatos; Cl⁻: cloretos.

O monitoramento das tensões do solo foi realizado com o auxílio de tensiômetros, os quais foram instalados nas profundidades de 15, 35 e 55 cm. As Figuras 4 e 5 apresentam os valores de tensão obtidos ao longo do período experimental.

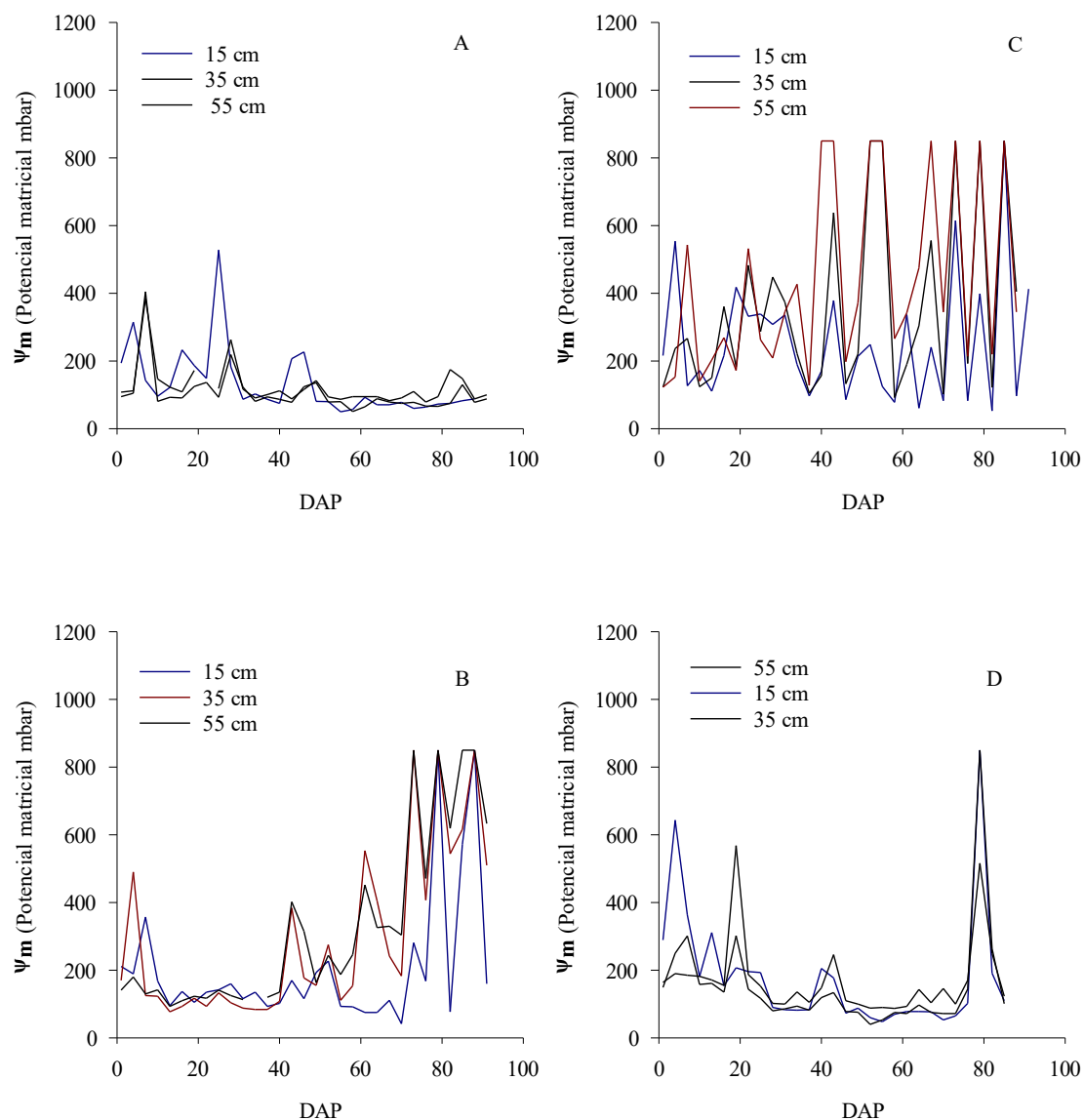


Figura 4. Valores de potencial matricial (ψ_m) durante a condução experimental no ambiente I: (A) T1; (B) estresse nas fases II, III e IV; (C) estresse nas fases III e IV; e (D) estresse na fase IV.

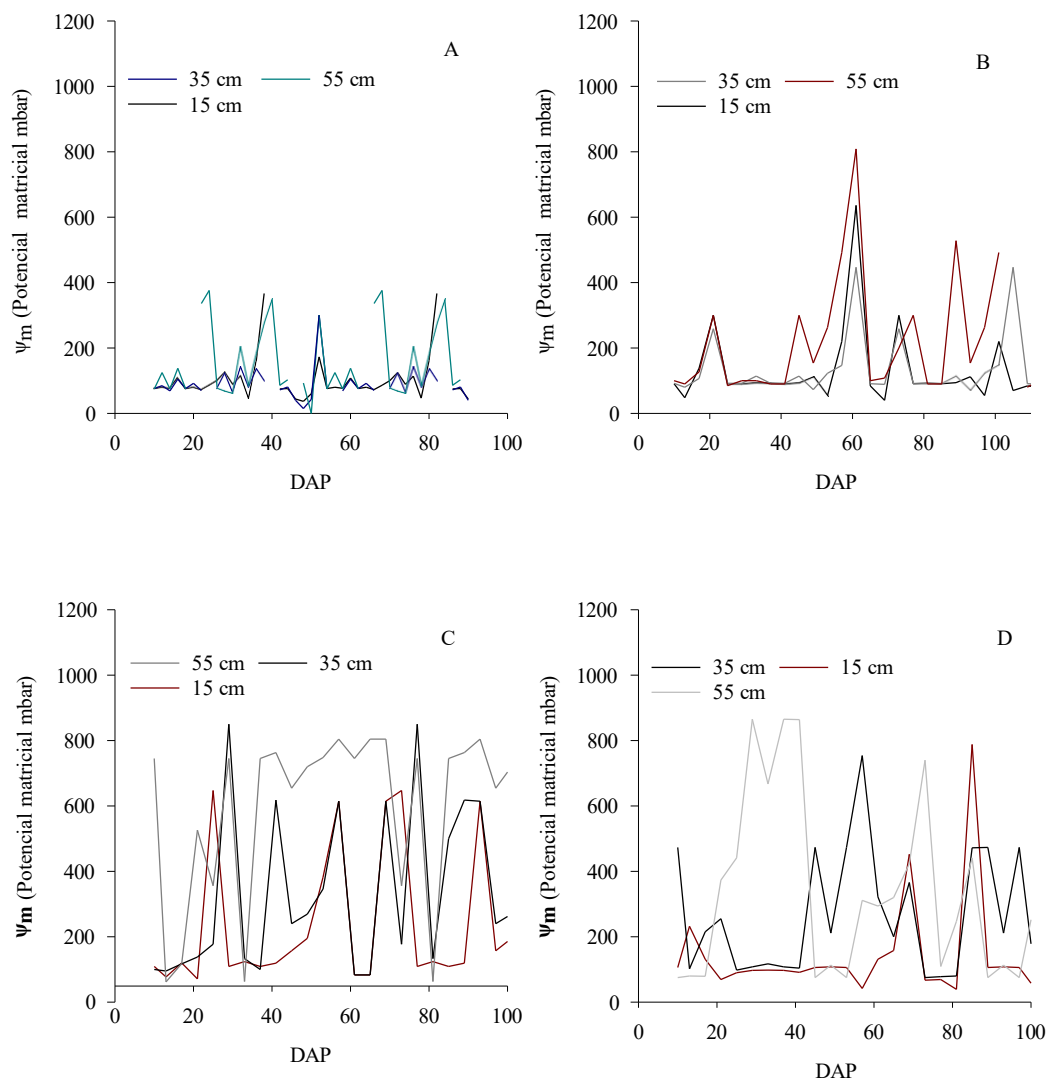


Figura 5. Valores de potencial matricial (ψ_m) durante a condução experimental no ambiente II: (A) T1; (B) estresse nas fases III; (C) estresse nas fases II, III e IV; e (D) estresse na fase II e IV.

Os valores de potencial matricial (ψ_m) do solo foram convertidos em umidade volumétrica de acordo com a curva de retenção do solo, a qual foi realizada de acordo com a metodologia de Richards (1949). A Figura 6 apresenta as curvas de retenção dos solos nos ambientes I e II.

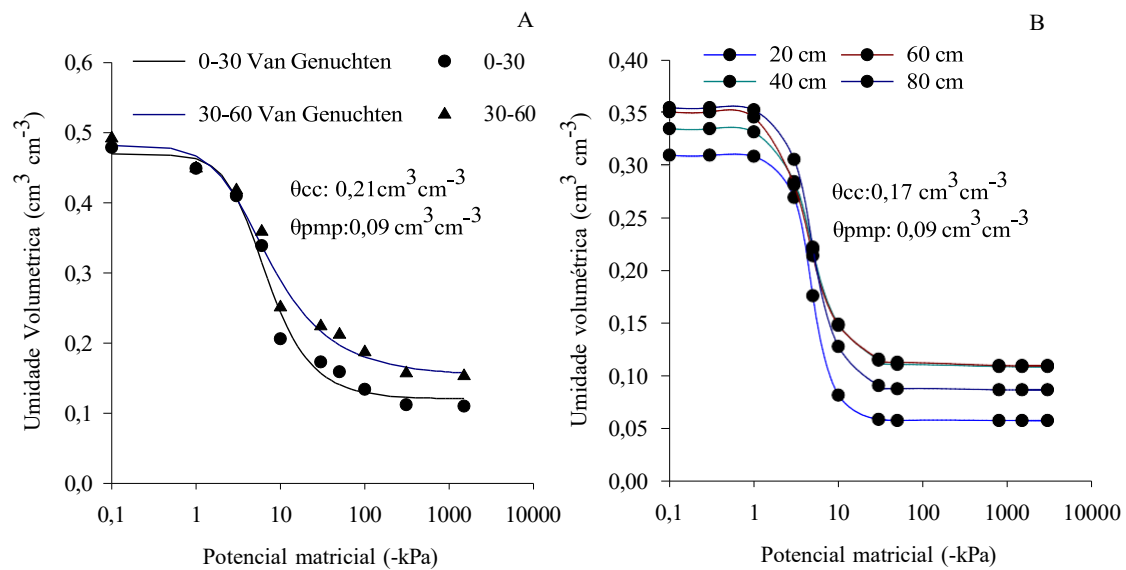


Figura 6. Curva de retenção do solo da área experimental nos ambientes I (6A) e II (6B).

Monitoramento climático

No ambiente I, os dados climáticos foram obtidos por meio de uma estação meteorológica instalada na própria área experimental. Já no ambiente II, o monitoramento climático foi realizado com dados da estação meteorológica de Mossoró-RN, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, Brasil). Os dados climáticos estão apresentados nas Figuras 6A e 6B. Os valores médios de ET_0 e de radiação observados nos experimentos I e II foram 6,8 mm e 5,6 mm, respectivamente. Por outro lado, os valores de temperatura média foram de 28,22 e 28,64 °C.

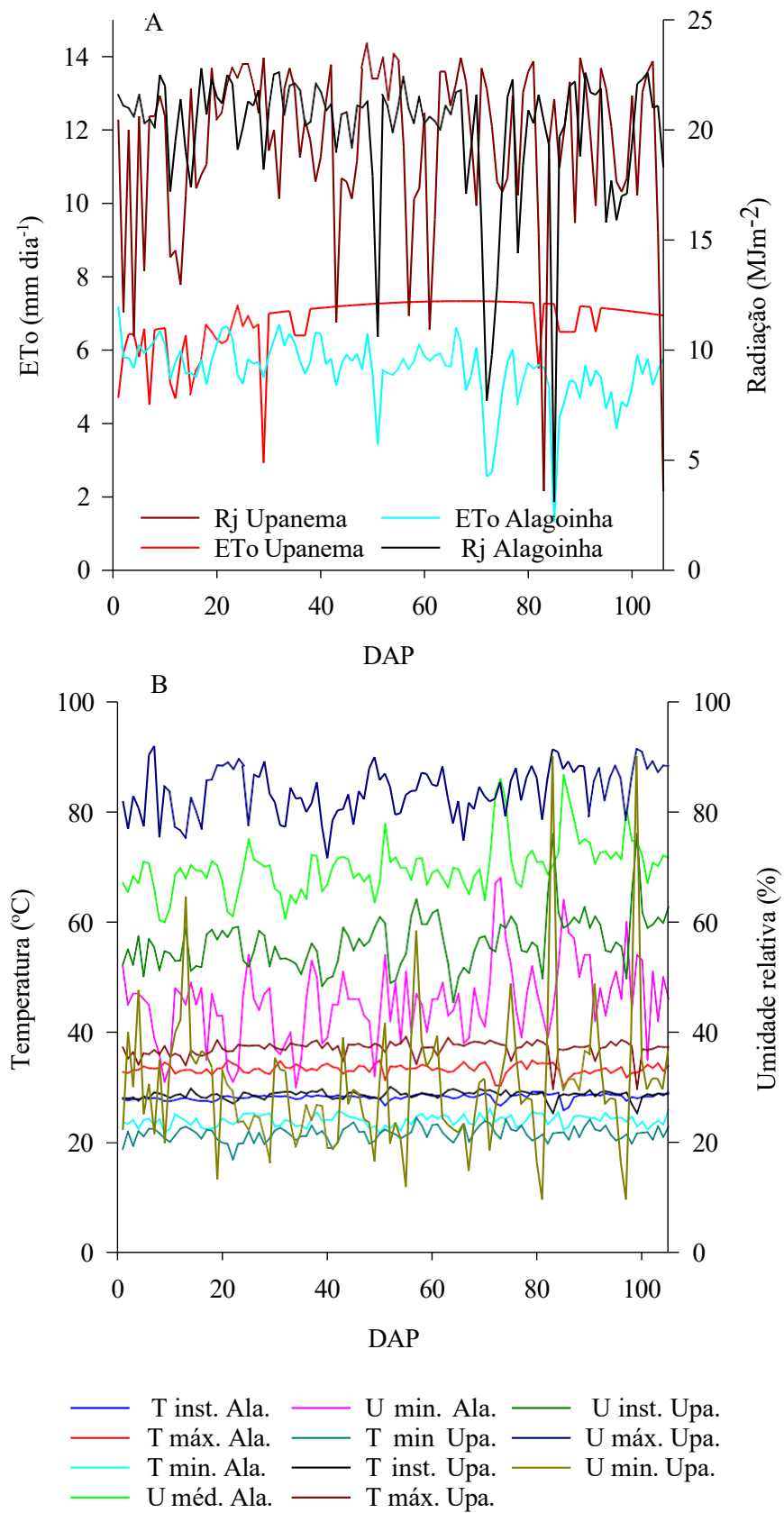


Figura 6. Radiação solar e evapotranspiração de referência (ET₀) (A) e temperaturas média, máxima e mínima (B), obtidas nos ambientes I e II.

Rendimento de forragem

A estimativa do rendimento de forragem foi realizada por meio do corte das plantas localizadas na área central de cada parcela útil. O corte foi efetuado aos 101 e 106 dias após o plantio para os ambientes I e II, respectivamente, considerando-se uma fileira com quatro metros lineares por parcela. Para a determinação do teor de massa seca, foi realizada a colheita de cinco plantas por parcela. Essas plantas foram cortadas e separadas em colmo, folha e panícula, a fim de determinar o peso fresco total e o peso fresco de cada componente. Após a pesagem, as amostras foram acondicionadas em estufa de secagem a 65 °C até atingirem peso constante.

Com base nos valores de massa fresca e seca, foram calculados os teores de massa seca das plantas. O rendimento de biomassa seca total foi determinado pelo produto entre a massa fresca obtida nos quatro metros lineares e a proporção de massa seca determinada nas cinco plantas amostradas, sendo os resultados expressos em Mg ha^{-1} , conforme metodologia descrita por Detmann et al. (2012).

Para determinar a produtividade da água de irrigação, utilizou-se a razão entre a produção de massa fresca (kg) e a quantidade de água aplicada em cada lâmina de irrigação (mm) (Dominguez et al., 2012).

Análise nutricional

Ao final do ciclo do sorgo, foram determinados os teores de Na, K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn, de acordo com a metodologia descrita por Silva (2009). Inicialmente, as folhas do sorgo foram colocadas em estufa de circulação a uma temperatura de 65 °C, até atingirem o peso constante. Após a secagem, o material foi triturado, utilizando um moinho do tipo Willey, com o qual foram obtidas as farinhas de tecido. Em seguida, foram pesadas 500 mg de cada amostra, as quais foram submetidas ao processo de digestão nítrica em micro-ondas. Para isso, o material foi transferido para tubos com tampas rosqueadas contendo 5 mL de ácido nítrico (HNO_3) e deixados em um forno micro-ondas por 40 minutos. Concluída a digestão, o extrato foi completado com água deionizada até atingir o volume de 25 mL. Posteriormente, foram determinados os teores de Na, K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn em um espectrômetro de emissão óptica com plasma indutivo (ICP). Os micronutrientes foram expressos em mg kg^{-1} , enquanto os macronutrientes foram expressos em g kg^{-1} .

A análise dos teores de nitrogênio seguiu a metodologia descrita por Silva (2009), utilizando amostras com 100 mg da farinha de tecido vegetal, as quais foram transferidas para tubos digestores, adicionando-se 1 g de mistura de sais ($K_2SO_4 + CuSO_4$), 3 mL de H_2SO_4 98% e 1 mL de H_2O_2 . Os tubos digestores foram colocados em um bloco digestor, o qual foi aquecido de forma lenta, até atingir 350 °C. Após a digestão, o extrato foi completado com água deionizada até atingir 50 mL. O extrato (10 mL) foi transferido para o destilador de Kjeldahl. Após a destilação, o teor de nitrogênio foi determinado por meio da titulação do material destilado, com uma solução de HCl 0,01 mol L⁻¹.

Produção de etanol e cogeração de energia

Para a produção de etanol, foram coletados cinco colmos da área experimental. Após a coleta, esses colmos foram levados para uma prensa elétrica, onde foi realizada a extração do caldo. A quantidade de sólidos solúveis totais (°Brix) presentes no caldo foi medida através de um refratômetro digital portátil. Para determinar o teor de sacarose presente no caldo, foi aplicada a seguinte equação: Sacarose = $1,093 \times (^\circ\text{Brix}) - 9,104$ (Lira et al., 2023).

O teor de fibra foi determinado através do produto entre os valores de massa seca (%) e o °Brix (Lira et al., 2023). A pureza do caldo foi determinada através da razão entre o teor de sacarose e o °Brix. Para determinar os açúcares redutores corrigidos, utilizou-se a equação: $ARC = AR \times (1 - 0,01 \times F) \times (1,0313 - 0,00575 \times F)$ (Lira et al., 2023).

O açúcar total recuperável foi determinado através da equação: $ATR = (10 \times \text{suco de Pol} \times 1,05263 \times 0,905) + (10 \times ARC \times 0,905)$. Por fim, o etanol foi calculado através da razão entre o açúcar teórico recuperável (ATR) e a eficiência da fermentação e destilação, adotando um valor de 1,613 por kg de ATR (CONSECANA, 2011).

O açúcar redutor foi determinado segundo o método colorimétrico de Somogyi (1945) e Nelson (1952), e os açúcares totais foram obtidos com a metodologia descrita por Yemm e Willis (1954).

Análise estatística

Os dados foram submetidos às análises de normalidade e homoscedasticidade. Para verificar a normalidade dos resíduos, aplicou-se o teste de Shapiro–Wilk; para avaliar a homoscedasticidade, utilizou-se o teste de Bartlett, adotando-se, em ambos os casos, o nível de significância de 5%.

Após a validação das premissas, realizou-se a análise de variância (ANOVA) pelo teste F, com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). Para os tratamentos que apresentaram diferença significativa, aplicou-se o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os experimentos foram analisados de forma conjunta e isolada. Todas as análises foram conduzidas utilizando o software Sisvar (Ferreira, 2011).

RESULTADOS

Rendimento de forragem e produção de caldo

De acordo com a análise de variância (Tabela 2), a variável massa seca apresentou efeito significativo do estresse, do ambiente e da interação ambiente $\times$ estresse ($p < 0,05$), conforme o teste F. As variáveis massa seca, peso do caldo e produtividade da água de irrigação foram significativamente afetadas pelo ambiente e pelo estresse; entretanto, não foi observada interação significativa entre ambiente $\times$ estresse para essas variáveis ($p > 0,05$), de acordo com o teste F.

Tabela 2. Resumo da ANOVA (estatística F) das variáveis produtivas do sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Variáveis	Fonte de variação			
	Ambiente (A)	Estresse (E)	S $\times$ E	CV (%)
M.F	39.549 **	6.655 **	2.393*	11.29
M.S	7.708 **	4.016 **	1.849 ns	12.10
P.C	31.784 **	5.280 **	1.953 ns	12.63
P. A	9.909 **	7.007 **	1.252 ns	14.10

MV: Massa Fresca; M.S: Massa seca; P.C.: Peso do caldo; PA: Produtividade da água; CV – Coeficiente de variação (%); ns: não significativo ($p > 0,05$); **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) pelo teste F.

De modo geral, para a variável massa fresca (M.F.), os maiores incrementos de produtividade foram obtidos no tratamento T1 (sem estresse), com produtividade média de 50,28 Mg ha⁻¹ (Tabela 3). Entre os tratamentos submetidos ao estresse hídrico, os melhores resultados foram observados nos tratamentos estresse nas fases III-IV, estresse na fase IV, estresse na fase III e estresse na fase II, com produtividades médias de 44,04; 43,26; 43,73 e 43,21 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Por outro lado, as menores médias de produtividade foram registradas nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV; estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV; o que

evidencia que as fases III e IV apresentam maior resistência ao estresse hídrico, sendo viável a aplicação do estresse de forma isolada ou combinada nessas fases. Em contraste, os resultados indicam que o estresse hídrico na fase II é viável apenas quando aplicado de forma isolada, pois ocorre redução da produtividade quando este é associado a estresses em outras fases.

Em relação à massa seca (M.S.), as maiores médias foram observadas nos tratamentos sem estresse, estresse nas fases III-IV, estresse na fase IV, estresse na fase III, estresse na fase II e estresse nas fases II-IV, com as seguintes médias: 11,95; 11,53; 11,62; 11,10; 11,47 e 10,77 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Em contrapartida, as menores médias foram obtidas nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV e estresse nas fases II e III, demonstrando que o estresse hídrico pode ser aplicado nas fases II, III e IV; no entanto, quando aplicado de forma combinada entre as fases II e III, ocorre redução na produção.

A variável peso do caldo apresentou as maiores médias nos tratamentos sem estresse, estresse, nas fases III-IV e estresse na fase IV. Os resultados indicam que, para essa variável, o estresse hídrico nas fases III e IV, aplicado de forma isolada ou combinada, promove desempenho semelhante ao observado em sistemas com irrigação plena. Por outro lado, a aplicação de estresse hídrico na fase II resultou em redução da produção de caldo, independentemente de ter sido aplicado de forma isolada ou combinada.

Para a variável produtividade da água de irrigação, as maiores médias foram obtidas nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV, estresse nas fases III-IV, estresse na fase III e estresse nas fases II-III, o que demonstra que, embora o estresse hídrico possa reduzir a produção em relação à irrigação plena, a relação entre a produção de massa fresca e a quantidade de água aplicada mantém-se viável do ponto de vista produtivo.

Tabela 3. Efeito do estresse hídrico em diferentes fases fenológicas na produtividade de massa seca e massa fresca, peso do caldo e produtividade da água do sorgo sacarino, considerando as médias de dois ambientes.

Tratamento (Fase com déficit)	Variáveis			
	M.F	M.S	P.C	P. A
T1	50.28 a	11.95 a	22.24 a	104,27 b
2-3-4	35.45 c	9.26 b	16.08 b	139.27 a
3-4	44.04 b	11.53 a	20.38 a	142.59 a

4	43.26 b	11.62 a	20.67 a	102.41b
3	43.73 b	11.10 a	20.71 a	123.74 a
2	43.21 b	11.47 a	19.05 b	108.03 b
2-3	39.27 c	9.85 b	17.58 b	132.25 a
2-4	39.71 c	10.77 a	18.46 b	109.31 b

MV: Massa Fresca (Mg ha⁻¹); M.S: Massa seca (Mg ha⁻¹); P.C: Peso do caldo (Mg ha⁻¹) PA: Produtividade da água (kg mm⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Quando comparados os resultados obtidos nos ambientes I e II, observa-se que o ambiente I favoreceu a produtividade de massa fresca, massa seca e peso do caldo. Por outro lado, a produtividade da água de irrigação não apresentou diferença significativa, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Médias da produtividade de massa fresca e seca, produção de caldo e produtividade da água do sorgo sacarino submetido a estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, avaliadas em ambientes.

Ambiente	Variáveis			
	M.V	M.S	P.C	P. A
Ambiente I	46.13 a	11.40 a	21.21 a	116.11 a
Ambiente II	38.61 b	10.48 b	17.41b	124.35 a

MF: Massa Fresca (Mg ha⁻¹); M.S: Massa seca (Mg ha⁻¹); P.C: Peso do caldo (Mg ha⁻¹) PA: Produtividade da água (kg mm⁻¹). Ambiente 1: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; ambiente 2 Ambiente da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Ao analisar os ambientes de forma isolada, observa-se que, no ambiente I, as maiores médias de massa fresca foram obtidas nos tratamentos sem estresse, estresse na fase IV e estresse na fase III, com valores médios de 50,54; 49,76 e 50,05 Mg ha⁻¹, respectivamente, conforme a Tabela 5. Isso demonstra que, nas condições do ambiente I, o estresse hídrico aplicado nas fases III e IV, de forma isolada, resulta em produtividade semelhante à obtida com irrigação plena.

Por outro lado, os tratamentos sem estresse, estresse nas fases III-IV, estresse na fase II, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV apresentaram as menores médias, o que demonstra que, nas condições do ambiente I, a aplicação de estresse hídrico na fase II, isoladamente ou em combinação com outras fases, resulta em redução da produtividade do sorgo.

Em relação à massa seca, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Por outro lado, as maiores médias de peso do caldo foram observadas nos tratamentos sem

estresse, estresse nas fases III-IV, estresse na fase IV e estresse na fase III, com valores de 23,28; 21,35; 23,37 e 24,50 Mg ha⁻¹, respectivamente. Em contrapartida, os tratamentos estresse nas fases II-III-IV, estresse na fase II, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV apresentaram as menores médias, demonstrando que o estresse hídrico pode ser aplicado nas fases III e IV; entretanto, a aplicação de estresse hídrico na fase II mostrou-se inviável, independentemente da combinação adotada. A produtividade da água de irrigação apresentou os melhores resultados nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV, estresse nas fases III e estresse nas fases II-IV, com valores médios de 126,16; 126,19 e 126,27 kg mm⁻¹, respectivamente.

No ambiente II (Tabela 5), observa-se que a maior produção de massa fresca foi obtida no tratamento sem estresse. Entretanto, ao considerar apenas os tratamentos submetidos ao estresse hídrico, os melhores resultados foram observados nos tratamentos com estresse nas fases III-IV e estresse na fase II, com médias de 42,33 e 41,39 Mg ha⁻¹, respectivamente. Esses resultados indicam que o estresse hídrico combinado nas fases III e IV constitui uma alternativa viável; por outro lado, o estresse hídrico na fase II apresenta viabilidade apenas quando aplicado de forma isolada.

As variáveis massa seca e peso do caldo apresentaram comportamentos semelhantes, com os tratamentos sem estresse, estresse nas fases III-IV e estresse na fase II registrando os melhores resultados para ambas as variáveis. Dessa forma, observa-se que, no ambiente II, a produtividade de massa seca e a produção de caldo obtidas sob estresse hídrico na fase II, ou nas fases III e IV são semelhantes às obtidas sob irrigação plena.

Em relação à produtividade da água de irrigação, os tratamentos com estresse nas fases II-III-IV e estresse nas fases III-IV apresentaram as maiores médias, evidenciando que, embora o estresse hídrico possa reduzir a produção do sorgo, a relação entre a quantidade de água aplicada e a produção obtida mantém-se viável do ponto de vista produtivo.

Tabela 5. Valores médios da massa fresca e seca, produção de caldo e produtividade da água do sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.

Tratamento Fase com déficit	Ambiente I			
	M.F	M.S	P.C	P. A
T1	50.54 a	11.71 a	23.28 a	94. 01 b
2-3-4	38.03 b	9.49 a	17.19 b	131.50 a
3-4	45.75 b	11.34 a	21.35 a	126.19 a

4	49.76 a	12.72 a	23.37 a	103.92 b
3	51.07 a	12.38 a	24.50 a	130.42 a
2	45.03 b	11.34 a	19.53 b	97.85 b
2-3	45.46 b	10.97 a	20.10 b	137.02 a
2-4	43.40 b	11.27 a	20.36 b	103.89 b
Tratamento	Ambiente II			
Fase com déficit	M.F	M.S	P.C	P. W
T1	50.02 a	12.19 a	20.87 a	114.53 b
2-3-4	32.88 c	9.04 b	14.96 b	147.05 a
3-4	42.33 b	11.72 a	19.41 a	154.57 a
4	36.76 c	10.49 b	16.94 b	100.90 b
3	36.39 c	9.82 b	16.92 b	117.43 b
2	41.39 b	11.59 a	18.56 a	118.21 b
2-3	33.08 c	8.73 b	15.07 b	127.41 b
2-4	36.03 c	10.27 b	16.55 b	114.73 b

MF: Massa Fresca (Mg ha⁻¹); M.S: Massa seca (Mg ha⁻¹); P.C: Peso do caldo (Mg ha⁻¹); P.A: Produtividade da água (kg mm⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott (p > 0,05).

Análise nutricional

O estresse hídrico não exerceu efeito significativo sobre a absorção foliar dos micronutrientes Fe, Cu, Mn e Zn (p > 0,05). Em contraste, o ambiente influenciou significativamente a absorção foliar de Cu, Mn e Zn (p < 0,05) (Tabela 6). Por outro lado, não foi observada influência do ambiente na absorção de Fe. A interação ambiente × estresse apresentou significância apenas para a absorção de Fe (p < 0,05), não sendo observada significância da interação sobre a absorção de Cu, Mn e Fe.

Tabela 6. Resumo da ANOVA dos teores de nutrientes foliares em sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Variáveis	Fontes de variação			
	Ambiente (A)	Estresse (E)	S x E	CV (%)
Cu	6.321 *	2.227 ns	2.858 *	52.17
Mn	16.964 **	1.268 ns	1.772 ns	41.13
Fe	1.814 ns	0.984 ns	1.196 ns	42.94
Zn	8.136 **	1.704 ns	1.451 ns	31.59
N	1.895 ns	0.405 ns	0.956 ns	41.51
Ca	4.556 **	1.105 ns	1.419 ns	36.62
Mg	3.615 ns	1.776 ns	1.868 ns	45.09
Na	118.735 **	0.441 ns	0.223 ns	62.45
P	0.695 ns	1.497 ns	0.687 ns	26.18
K	3.485 ns	3.484 **	1.790 ns	27.36

N: nitrogênio; Ca: cálcio; Mg: magnésio; Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: ferro; Zn: zinco; Na: sódio; P: fósforo; K: potássio; ns: não significativo ($p > 0.05$); **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$); *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0.05$) pelo teste F.

A concentração foliar de N, Ca, Mg, Na, P e K não foi afetada de forma significativa pelo estresse hídrico ($p > 0,05$). No entanto, o estresse hídrico apresentou efeito significativo sobre a concentração foliar de P ($p < 0,05$). Por outro lado, o ambiente influenciou significativamente a concentração foliar de Na e Ca ($p < 0,05$), não sendo observada significância para os demais macronutrientes. A interação ambiente $\times$ estresse não apresentou efeito significativo em nenhum macronutriente ($p > 0,05$).

Micronutrientes

De acordo com o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, as médias dos teores foliares de Mn, Cu e Fe não diferiram significativamente, indicando que o estresse hídrico não afetou a absorção desses micronutrientes (Tabela 7). Para o teor foliar de Cu, os maiores valores médios foram observados nos tratamentos com estresse na fase III, estresse na fase II, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV.

Tabela 7. Médias dos teores de micronutrientes foliares do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, avaliados em dois ambientes distintos.

Tratamento (Fase com estresse)	Variáveis			
	Cu	Mn	Fe	Zn
T1	3.78 b	54.82 a	121.41a	18.17 a
2-3-4	4.91 b	62.05 a	143.76 a	20.64 a
3-4	4.57 b	72.66 a	118.58 a	24.93 a
4	3.53 b	83.75 a	122.95 a	22.70 a
3	6.78 a	60.44 a	175.58 a	24.13 a
2	6.33 a	65.71 a	150.67 a	27.76 a
2-3	7.8 a	67.83 a	145.24 a	21.92 a
2-4	5.76 a	87.36 a	168.96 a	28.23 a

Cu: cobre (mg kg^{-1}); Mn: manganês (mg kg^{-1}); Fe: ferro (mg kg^{-1}); Zn: zinco (mg kg^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Ao comparar as médias obtidas nos ambientes I e II, verificou-se que o ambiente II favoreceu a absorção de Cu, Mn e Zn. Por outro lado, não houve diferença significativa entre os teores médios de Fe foliar obtidos nos ambientes I e II (Tabela 8).

Tabela 8. Médias dos teores de micronutrientes foliares do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, avaliadas em dois ambientes.

Ambiente	Variáveis			
	Cu	Mn	Fe	Zn
Ambiente I	4.54 b	54.65 b	133.03 a	20.91 b
Ambiente II	6.32 a	84.01 a	153.76 a	26.91 a

Cu: cobre (mg kg^{-1}); Mn: manganês (mg kg^{-1}); Fe: ferro (mg kg^{-1}); Zn: zinco (mg kg^{-1}). Ambiente I: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; ambiente 2: Ambiente da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Ao analisar os ambientes I e II de forma isolada (Tabela 9), observou-se que, no ambiente I, não houve diferença significativa entre as médias obtidas para Cu, Mn, Fe e Zn, de acordo com o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

No ambiente II, os maiores teores foliares de Cu foram obtidos nos tratamentos com estresse na fase III, estresse na fase II e estresse na fase IV. Para os teores foliares de Mn, as maiores médias foram observadas nos tratamentos com estresse na fase IV, estresse na fase II, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV. Já os teores de Fe e Zn não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos.

Tabela 9. Médias isoladas de micronutrientes foliares em sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.

Tratamento	Variáveis (Ambiente I)			
Fase com déficit	Cu	Mn	Fe	Zn
T1	3.81 a	47.27 a	107.70 a	16.23 a
2-3-4	5.45 a	69.35 a	164.40 a	20.91 a
3-4	4.52 a	57.45 a	116.05 a	21.23 a
4	3.95 a	47.76 a	101.77 a	23.91 a
3	5.56 a	56.63 a	174.67 a	22.01 a
2	4.17 a	45.18 a	124.47 a	26.01 a
2-3	3.35 a	42.30 a	91.73 a	13.60 a
2-4	5.53 a	71.23 a	183.43 a	22.46 a

Tratamento	Variáveis (Ambiente II)			
Fase com déficit	Cu	Mn	Fe	Zn
T1	3.75 b	62.37 b	135.12 a	20.12 a
2-3-4	4.37 b	54.75 b	123.12 a	20.37 a
3-4	4.62 b	87.87 a	121.12 a	28.62 a
4	3.12 b	119.75 a	144.12 a	21.50 a
3	8.00 a	64.25 b	176.50 a	26.25 a
2	8.50 a	86.25 a	176.87 a	28.62 a
2-3	12.25 a	93.37 a	198.75 a	30.25 a
2-4	6.00 b	103.50 a	154.50 a	34.00 a

Cu: cobre (mg kg^{-1}); Mn: manganês (mg kg^{-1}); Fe: ferro (mg kg^{-1}); Zn: zinco (mg kg^{-1}). Ambiente 1: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; ambiente 2: Ambiente da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Macronutrientes

De forma geral, o estresse hídrico não afetou significativamente as médias dos teores foliares de N, Ca, Mg, Na e P, de acordo com o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade (Tabela 10).

Para os teores foliares de K, as maiores médias foram observadas nos tratamentos sem estresse, estresse na fase IV, estresse na fase II, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV, com valores médios de 19,73; 17,23; 18,27; 16,43 e 20,61 g kg^{-1} , respectivamente.

Tabela 10. Médias de macronutrientes foliares e sódio em sorgo sacarino sob estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Tratamento (Fase com déficit)	Variáveis					
	N	Ca	Mg	Na	P	K
T1	7.08 a	6.34 a	3.87 a	0.39 a	2.38 a	19.73 a
2-3-4	8.31 a	6.34 a	3.31 a	0.32 a	2.68 a	14.88 b
3-4	8.48 a	7.93 a	3.9 a	0.33 a	2.04 a	14.67 b
4	7.39 a	6.80 a	3.35 a	0.33 a	2.10 a	17.23 a
3	7.43 a	6.29 a	3.09 a	0.41 a	2.18 a	11.35 b
2	6.93 a	5.20 a	2.45 a	0.46 a	2.18 a	18.27 a
2-3	6.43 a	6.28 a	2.93 a	0.47 a	2.73 a	16.43 a
2-4	7.91 a	7.88 a	4.86 a	0.43 a	2.51 a	20.61 a

Ca: cálcio (g kg^{-1}); Mg: magnésio (g kg^{-1}); Na: sódio (g kg^{-1}); P: fósforo (g kg^{-1}); K: potássio (kg^{-1}); N: nitrogênio (kg^{-1}). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

A Tabela 11 apresenta a comparação dos teores foliares de macronutrientes obtidos nos ambientes I e II. O ambiente I favoreceu a absorção de Ca e Na. Entretanto, as médias de N, Mg, P e K não diferiram estatisticamente, segundo o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Tabela 11. Médias dos teores de macronutrientes foliares e de sódio do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Ambiente	Variáveis					
	N	Ca	Mg	K	P	Na

Ambiente I	6.96 a	7.28 a	3.10 a	17.71 a	2.29 a	0.73 a
Ambiente I	8.03 a	5.98 b	3.84 a	15.58 a	2.41 a	0.05 b

Ca: cálcio (g kg⁻¹); Mg: magnésio (g kg⁻¹); Na: sódio (g kg⁻¹); P: fósforo (g kg⁻¹); K: potássio (kg⁻¹); N: nitrogênio (k g⁻¹). Ambiente 1: Ambiente da fazenda Cumaru, Upanema-RN; ambiente 2: Ambiente da Fazenda experimental Rafael Fernandes, Mossoró-RN. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Na análise isolada dos ambientes I e II, observa-se que, no ambiente I, apenas os teores de Mg e K foram afetados pelo estresse hídrico. Para o teor foliar de Mg, a maior média foi obtida no tratamento com estresse nas fases II-IV, com 6,09 g kg⁻¹ (Tabela 12). Por outro lado, os maiores teores de K foram observados nos tratamentos sem estresse, estresse na fase II e estresse nas fases II-IV.

No ambiente II, não houve diferença significativa entre os teores foliares de macronutrientes ($p > 0,05$), segundo o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Tabela 12. Médias isoladas dos teores de macronutrientes foliares do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Tratamento	Variáveis (Ambiente I)					
	N	Ca	Mg	Na	P	K
T1	6.73 a	6.22 a	3.57 b	0.75 a	2.33 a	21.09 a
2-3-4	8.75 a	7.46 a	2.73 b	0.62 a	2.62 a	15.63 b
3-4	7.61 a	8.97 a	3.54 b	0.62 a	1.98 a	13.29 b
4	10.15 a	8.97 a	2.96 b	0.62 a	2.30 a	17.08 b
3	7.78 a	7.32 a	2.89 b	0.75 a	2.40 a	10.39 b
2	7.96 a	4.18 a	1.12 b	0.85 a	2.03 a	19.91 a
2-3	6.65 a	5.98 a	1.88 b	0.85 a	2.77 a	18.12 b
2-4	8.66 a	9.93 a	6.09 a	0.78 a	2.89 a	26.16 a

Tratamento	Variável (Ambiente II)					
	N	Ca	Mg	Na	P	K
T1	7.43 a	6.46 a	4.16 a	0.03 a	2.42 a	18.37 a
2-3-4	7.87 a	5.22 a	3.88 a	0.025 a	2.75 a	14.12 a
3-4	9.36 a	6.89 a	4.27 a	0.051 a	2.10 a	16.06 a
4	4.63 a	5.40 a	3.74 a	0.047 a	1.90 a	17.37 a
3	7.08 a	5.27 a	3.29 a	0.070 a	1.96 a	12.31 a
2	5.95 a	6.22 a	3.77 a	0.077 a	2.33 a	16.64 a
2-3	6.21 a	6.58 a	3.99 a	0.081 a	2.69 a	14.74 a
2-4	7.17 a	5.82 a	3.63 a	0.087 a	2.14 a	15.07 a

Ca: cálcio (g kg⁻¹); Mg: magnésio (g kg⁻¹); Na: sódio (g kg⁻¹); P: fósforo (g kg⁻¹); K: potássio (kg⁻¹); N: nitrogênio (k g⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

Qualidade do caldo e produção de etanol

De acordo com a análise de variância (Tabela 13), as variáveis pH, acidez, °Brix, fibra, sacarose, pureza e açúcares totais não foram significativamente afetadas pelo estresse hídrico ($p > 0,05$). Por outro lado, houve efeito significativo do estresse hídrico sobre os açúcares redutores, o açúcar total recuperável e a produção de etanol ($p < 0,05$), conforme indicado pelo teste F.

Tabela 13. Resumo da análise de variância (estatística F) para as variáveis qualitativas do caldo do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Variáveis	Fontes de variação			
	Ambiente (A)	Estresse (E)	S × E	CV (%)
pH	18.719 **	1.463 ns	1.424 ns	2.47
AT	167.431**	0.883ns	1.715 ns	16.92
°Brix	142.388 *	3.7220ns	5.502 **	8.60
Fibra	55.594 **	1.657 ns	3.996 **	11.91
Sacarose	142.399 **	1.445 ns	5.506 **	13.36
Pureza	104.045 **	1.885 ns	4.510 **	6.49
AR	72.503 **	3.065 *	2.947 *	24.94
ARC	71.070 **	3.055 *	2.958 *	24.99
AT	93.261 **	0.755 ns	4.768 **	27.02
ATR	135.87**	1.948ns	5.925**	19.11
Etanol	30.78**	3.018*	3.614**	26.40

pH: potencial de hidrogênio; AT.: Acidez titulável total (%); °Brix (%); fibra (%); sacarose (%); pureza (%); açúcares redutores (%); açúcares totais (%); ATR Açúcar total recuperável (Kg/ton); Etanol (L/ha); CV – Coeficiente de variação (%). ns: não significativo ($p > 0.05$); **: significativo a 1% de probabilidade ($p < 0.01$); *: significativo a 5% de probabilidade ($p < 0.05$) pelo teste F.

O efeito do ambiente foi significativo para todas as variáveis avaliadas ($p < 0,05$). Entretanto, a interação ambiente × estresse não apresentou efeito significativo sobre o pH e a acidez ($p > 0,05$), sendo significativa para as demais variáveis ($p < 0,05$).

De acordo com o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, para a variável açúcar redutor (AR), as menores médias foram observadas nos tratamentos com estresse na fase IV e estresse nas fases II-III, com reduções de 18% e 29%, respectivamente, em relação à testemunha. Comportamento semelhante foi verificado para a variável açúcar recuperável total. Entretanto, a produção de etanol apresentou as menores médias nos tratamentos com estresse nas fases II-III-IV e estresse na fase III, indicando possível inviabilidade da aplicação

de estresse hídrico combinado nas fases II e III para a produção de etanol, conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14. Médias de variáveis qualitativas do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas.

Variáveis	Tratamento							
	T1	2	3-4	4	3	2	2-3	2-4
pH	5.1 a	5.2 a	5.08 a	5.06 a	5.04 a	5.05 a	5.06 a	5.03 a
A.T.	0.35 a	0.31a	0.36 a	0.35 a	0.32 a	0.37 a	0.35 a	0.36 a
°Brix	13.50 a	12.97 a	13.86 a	13.32 a	13.05 a	14.10 a	12.71 a	13.86 a
Fibra	1.97 a	2.13 a	1.94 a	2.27 a	2.07 a	1.94 a	2.07 a	2.03 a
Sacarose	5,7 a	5,1 a	6,0 a	6,4 a	5,2 a	6,3 a	4,8 a	6,1 a
Pureza	39,5 a	35,9 a	42,9 a	35,9 a	37,2 a	44,2 a	35,6 a	42,1 a
AR	0.90 a	0.97 a	0.87 a	0.75 b	0.90 a	1.08 a	0.64 b	0.83 a
ATR	62,1 a	57,1 a	65,4 a	60,1 a	57,3 a	69,9 a	51,6 a	58,9 a
Etanol	2220,3 a	1508,2 b	2126,1 a	2091,7 a	1842,6 a	2438,7a	1820,4 b	1865,3 a

pH: potencial de hidrogênio; AT: Acidez total (%); °Brix (%); Fibra (%); Sacarose (%); Pureza (%); AR: Açúcares redutores (%); ATR: Açúcar total recuperável (Kg/ton); Etanol (L/ha T1: 100% Etc; T2: 100% Etc na I 50% na II, III e IV; T3: 100% Etc na I e II e 50% na III e IV; T4: 100% Etc na I, II e III e 50% na IV; T5: 100% Etc na I, II e IV e 50% na III; T6: 100% Etc na I, III e IV e 50% na II; T7:100% Etc na I e IV e 50% na II e III; T8:100% Etc na I e III e 50% na II e IV. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

O ambiente I proporcionou maiores médias de pH, acidez, fibra, açúcares redutores e açúcar total recuperável, com valores de 5,14; 0,44%; 2,28%; 1,10% e 20,42 kg t⁻¹, respectivamente. Em contrapartida, o ambiente II favoreceu as médias de °Brix, sacarose, pureza, açúcares totais e produção de etanol, conforme o teste de Scott-Knott, a 5% de probabilidade (Tabela 15).

Tabela 15. Médias de variáveis qualitativas do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico em diferentes fases fenológicas, em dois ambientes.

Variáveis	Ambiente	
	Ambiente I	Ambiente II
pH	5,14 a	5,01 b
AT	0,44 a	0,25 b
°Brix	11,70 b	15,14 a
Fibra	2,28 a	1,82 b
Sacarose	3,84 b	7,45 a
Pureza	30,44 b	48,83 a
AR	1,10 a	0,63 b
ARC	1,09 a	0,64 b

AT	5,39 b	10,61 a
ATR	43,33 a	73,78 b
Etanol	1524,3 b	2207,34 a

pH: potencial de hidrogênio; AT.: Acidez total (%); °Brix (%); fibra (%); sacarose (%); pureza (%); açúcares redutores (%); açúcares totais (%); ATR Açúcar total recuperável (Kg/ton); Etanol (L/ha. Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$)).

Na análise isolada dos ambientes I e II, observa-se que, no ambiente I, a maior média de pH foi obtida no tratamento estresse nas fases II-III-IV, indicando que, nessas condições, o estresse hídrico pleno promoveu aumento do pH em relação ao estresse aplicado por fase e à irrigação plena (Tabela 16).

Para as variáveis °Brix, sacarose e pureza, as maiores médias foram observadas nos tratamentos com estresse nas fases III-IV, estresse na fase II e estresse nas fases II-IV, o que demonstra que o estresse hídrico aplicado na fase II, de forma isolada ou combinado entre as fases II e IV ou III e IV, pode favorecer o aumento desses parâmetros.

Os valores médios de açúcares redutores foram superiores nos tratamentos estresse nas fases II-III-IV e estresse na fase II; entretanto, o açúcar total apresentou maiores valores nos tratamentos com estresse na fase II, estresse nas fases II-III e estresse nas fases II-IV. Esses resultados indicam que o estresse hídrico na fase II eleva o teor de açúcares redutores apenas quando aplicado de forma isolada ou sob estresse pleno, enquanto, para o açúcar total, o estresse na fase II promove incremento independentemente de sua aplicação ser isolada ou combinada.

Os tratamentos com estresse nas fases III e IV e estresse na fase II apresentaram as maiores médias de açúcar total recuperável, demonstrando que o estresse hídrico de forma isolada na fase II ou a combinação de estresse nas fases III e IV pode aumentar o teor de açúcar total recuperável na cultura do sorgo. A produção de etanol foi superior nos tratamentos com estresse nas fases III e IV, estresse na fase III, estresse na fase II e estresse nas fases II e IV, o que corrobora que, embora o estresse hídrico possa reduzir a produção de caldo, a produção de etanol pode ser compensada em função da variação do °Brix.

No ambiente II, apenas °Brix, sacarose e produção de etanol apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. O maior °Brix foi registrado no tratamento com estresse na fase IV, enquanto sacarose e etanol foram superiores no tratamento sem estresse e no estresse

na fase IV, o que sugere que o estresse hídrico na fase IV é uma alternativa viável para a produção de etanol.

Tabela 16. Médias dos teores das variáveis qualitativas do sorgo sacarino submetido ao estresse hídrico nas diferentes fases fenológicas, avaliadas em dois ambientes.

Tratamento	Variável (Ambiente I)									
(Fase)	pH	AT	°Brix (%)	Fibra (%)	Sacarose	Pureza	AR	AT (%)	ATR (kg Mg ⁻¹)	Etanol (L/ha)
T1	5.17 b	0.42 a	11.12 b	2.25 b	3,06 b	27,2 b	1.15 b	3.32 b	39,52 b	1432,4 b
2-3-4	5.38 a	0.40 a	11.12 b	2.41 b	3,06 b	24,3 b	1.32 a	4.49 b	41,06 b	1169,7 b
3-4	5.17 b	0.47 a	13.15 a	1.98 b	5,27 a	39,06 a	1.08 b	4.59 b	60,03 a	2050,1 a
4	5.14 b	0.41 a	9.77 b	2.85 a	2,48 b	16,53 c	0.92 c	2.68 b	32,84 b	1245,3 b
3	5.09 b	0.40 a	11.45 b	2.29 b	3,41 b	27,8 b	1.14 b	4.66 b	42,78 b	2335,4 a
2	5.07 b	0.49 a	13.37 a	1.99 b	5,51 a	40,48 a	1.55 a	5.90 a	66,59 a	2116,4 a
2-3	5.10 b	0.45 a	10.75 b	2.34 b	2,65 b	24,2 b	0.72 c	8.92 a	31,73 b	1033,8 b
2-4	5.04 b	0.51 a	12.87 a	2.14 b	4,97 a	36,50 a	0.90 c	8.53 a	40,33 b	1719,6 a
Tratamento	Variável (Ambiente II)									
(Fase)	pH	AT	°Brix (%)	Fibra (%)	Sacarose	Pureza	AR	AT (%)	ATR (kg Mg ⁻¹)	Etanol (L/ha)
T1	5.02 a	0.26 a	15.87 a	1.69 a	8,3 a	51,8 a	0.66 a	11.84 a	84,6 a	3008,2 a
2-3-4	5.01 a	0.22 a	14.82 b	1.85 a	7,1 b	47,6 a	0.61 a	10.80 a	73,2 a	1846,8 b
3-4	5.00 a	0.26 a	14.57 a	1.90 a	6,8 b	46,8 a	0.63 a	11.39 a	70,8 a	2202,0 b
4	4.98 a	0.29 a	16.87 a	1.69 a	9,3 a	55,8 a	0.57 a	11.54 a	94,2 a	2728,1 a
3	4.98 a	0.25 a	14.65 b	1.86 a	6,4 b	46,8 a	0.66 a	11.04 a	71,8 a	1946,7 b
2	5.03 a	0.25 a	14.82 b	1.89 a	7,1 b	47,8 a	0.62 a	10.09 a	73,3 a	2188,6 b
2-3	5.03 a	0.25 a	14.70 b	1.80 a	6,9 b	47,8 a	0.57 a	9.71 a	71,5 a	1727,4 b
2-4	5.01 a	0.22 a	14.85 b	1.91a	7,1 b	47,8 a	0.76 a	8.46 a	74,8 a	2010,9 b

pH: potencial de hidrogênio; AT: Acidez total (%); °Brix (%); fibra (%); sacarose (%); pureza (%); açúcares redutores (%); açúcares totais (%); ATR Açúcar total recuperável (Kg/ton); Etanol (L/há). Médias seguidas pela mesma letra pertencem ao mesmo grupo de acordo com o teste de Scott-Knott ($p > 0,05$).

DISCUSSÃO

Rendimento de forragem e produção de caldo

Os resultados deste estudo indicam que o déficit hídrico pode reduzir a produção de massa fresca do sorgo sacarino; entretanto, seus efeitos variam conforme a fase de ocorrência, sendo mais prejudiciais em determinadas fases do seu ciclo. A redução da produção de massa fresca sob estresse hídrico está associada ao fato de que condições mais severas de déficit hídrico comprometem características morfológicas, como altura da planta, diâmetro do caule, área foliar, número e densidade de folhas (Fardim et al., 2023). Ademais, o estresse hídrico reduz o potencial hídrico dos tecidos foliares, o que diminui o potencial de pressão a níveis insuficientes para a divisão celular e, consequentemente, reduz a produção de massa fresca da parte aérea (Anjum et al., 2017).

Além disso, o estresse hídrico impede o crescimento da planta por meio do acúmulo de ácido abscísico, que induz o fechamento estomático e reduz a atividade fotossintética, além de gerar acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), capazes de danificar estruturas celulares e diminuir ainda mais a produção de massa fresca (Golzardi et al., 2017; Aghajani et al., 2023; Tavazoh et al., 2024).

A cultura do sorgo apresenta elevada tolerância ao estresse hídrico; entretanto, os resultados deste estudo indicam que a combinação de estresse hídrico nas fases II e III ou II e IV pode ocasionar perdas de rendimento semelhantes às observadas em sistemas com déficit constante. Esse efeito ocorre porque a fase II corresponde ao período de maior crescimento vegetativo, e o estresse hídrico nessa fase pode interromper o desenvolvimento vegetativo, provocar perdas de folhas verdes, retardar o florescimento e reduzir a biomassa da planta e da panícula (Tovignan et al., 2023). Rakshit et al. (2016) relataram que a ocorrência de estresse hídrico nas fases iniciais pode resultar em perdas de até 55% na biomassa foliar. Vale destacar que, mesmo que ocorra estresse na fase II, a aplicação de irrigação plena nas fases subsequentes (III e IV) permite à cultura recuperar seu estado fisiológico e retomar a produção de biomassa.

A produção de caldo foi reduzida com o estresse hídrico na fase II, independentemente da combinação. A fase II é aquela em que ocorre o alongamento do colmo; assim, uma redução da reposição hídrica nessa fase reduz o tamanho dos colmos, o que resulta em plantas menores, com colmos mais finos e menor quantidade de caldo extraível. Nesse contexto, Silva et al. (2025) relataram que a principal resposta das plantas ao déficit hídrico é a redução do teor de água nos tecidos vegetais.

As produções de massa fresca, massa seca e caldo foram superiores no ambiente I, resultado que está associado às características físicas do solo. O experimento do ambiente I ocorreu em um solo de textura franco-argilosa, o que favorece a maior retenção de água, permitindo ao solo armazenar mais umidade em comparação ao solo do ambiente II, que apresentava textura areia-franca e menor capacidade de retenção hídrica. Além disso, as diferenças de produtividade entre os ambientes também podem estar relacionadas a fatores ambientais e a problemas na germinação das plantas, conforme relatado por Silva et al. (2025), além da diferença entre os estandes finais de cada ambiente e das características naturais de fertilidade do solo do ambiente I.

Embora o estresse hídrico de 50% possa reduzir a produtividade do sorgo sacarino, os dados obtidos no ambiente I indicam que, a depender do manejo adotado, a cultura pode manter produtividade semelhante àquela observada em sistema de irrigação plena. Nessas condições, o sorgo apresentou resposta satisfatória ao estresse hídrico, uma vez que, mesmo quando o déficit ocorreu nas fases III ou IV, a produção de massa fresca foi semelhante à reportada por Silva et al. (2025), em condições similares, porém sem déficit hídrico.

Além disso, os tratamentos estresse na fase IV e estresse na fase III, apesar da imposição do estresse, apresentaram produtividade superior à observada por Silva et al. (2025) sob estresse hídrico de 50% da ETc, cujos valores variaram entre 40 e 45 Mg ha⁻¹. Adicionalmente, os resultados obtidos neste estudo foram superiores aos relatados por Bhattarai et al. (2020), que avaliaram a aplicação de estresse hídrico em sorgo forrageiro e milheto.

Para a produção de massa seca no ambiente I, não houve influência significativa do déficit hídrico. Entretanto, de modo geral, os valores observados foram inferiores aos relatados por Lira et al. (2023), Silva et al. (2023) e Kirchner et al. (2019), que reportaram rendimentos próximos a 30 Mg ha⁻¹.

Os resultados obtidos no ambiente II indicam que, nessas condições, o estresse hídrico afeta a produtividade do sorgo, independentemente do manejo de irrigação, embora existam fases fenológicas mais sensíveis ao déficit hídrico do que outras. A redução da produtividade está associada à menor capacidade do solo em reter umidade, uma vez que, mesmo com o déficit controlado entre as fases, a limitação na retenção de água compromete o crescimento da cultura.

O estresse hídrico, embora tenha reduzido a produção de massa fresca, proporcionou maiores produtividades da água de irrigação. Isso ocorre porque o sorgo apresenta resistência ao estresse hídrico e, sob condições de déficit hídrico, a economia de água supera as perdas observadas na produção. A produtividade da água de irrigação não apresentou diferenças significativas entre os ambientes, o que está diretamente relacionado à precipitação e aos valores de ET₀ obtidos durante o ambiente II. Embora o consumo diário de água tenha sido menor no ambiente II, a redução no consumo de água total, causada pelas diferenças na duração da fase IV, resultou em valores semelhantes para a produtividade da água entre os ambientes.

De modo geral, os valores de produtividade de massa fresca e massa seca obtidos no ambiente I foram inferiores aos relatados por Kirchner et al. (2019), Silva et al. (2023) e Silva et al. (2025) com as cultivares IPA SF-15 e BRS-506, sendo que apenas o tratamento sem estresse hídrico apresentou rendimento semelhante ao observado por esses autores. O mesmo comportamento foi verificado para a produtividade de massa seca.

Análise nutricional

Micronutrientes

O estresse hídrico pode afetar a absorção de micronutrientes de diversas maneiras, incluindo alterações na mineralização dos nutrientes, redução na difusão e no fluxo de massa e diminuição do crescimento radicular, o que impacta a cinética de absorção pelo sistema radicular (He & Dijkstra, 2014; Bista et al., 2018). No entanto, no presente estudo, o estresse hídrico não afetou significativamente a concentração foliar de micronutrientes, exceto o cobre (Cu). Esses resultados indicam que, mesmo nos tratamentos submetidos ao déficit hídrico, a umidade disponível no solo foi suficiente para manter a absorção adequada dos nutrientes. O resultado é semelhante aos encontrados por Cunha et al. (2024) que não observaram efeito do déficit hídrico sobre a absorção de micronutrientes na cultura do sorgo.

A maior absorção de Cu, Mn e Zn observada no ambiente II está relacionada às condições específicas de cada solo, uma vez que a absorção de nutrientes também pode depender da variedade de sorgo utilizada. Ademais, a disponibilidade de nutrientes no solo está diretamente ligada às suas características físico-químicas, que influenciam a ciclagem de nutrientes e a liberação de elementos disponíveis, impactando a absorção pelas plantas (Zheng et al., 2021; Ye et al., 2024). Essas respostas podem, ainda, estar associadas às condições de plantio e às características meteorológicas de cada local (Ye et al., 2024). O solo do ambiente I, por ser de origem calcária e a água ser também de um aquífero do arenito calcífero, apresenta reação alcalina, o que diminui a disponibilidade desses micronutrientes.

O efeito do estresse hídrico sobre a concentração foliar de Cu e Mg pode estar relacionado ao estresse oxidativo induzido pelo déficit hídrico nas plantas. Em condições de estresse hídrico, ocorre aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) nas células vegetais. Para evitar que esse acúmulo cause danos oxidativos, as plantas ativam seu sistema antioxidante enzimático, que é composto por catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e glutatona peroxidase (GPX) (Zhao et al., 2021; Mahdavian et al., 2025).

Como a SOD é considerada uma enzima-chave nesse processo e possui formas que contêm cobre, zinco ou manganês como cofatores, o estresse hídrico pode ter estimulado a maior absorção e/ou redistribuição de cobre e manganês pela planta, como estratégia para intensificar a atividade da SOD e reduzir os efeitos do estresse oxidativo (Zhao et al., 2021).

Macronutrientes

De modo geral, o estresse hídrico não interferiu na absorção dos macronutrientes pelo sorgo sacarino; entretanto, houve efeito sobre a absorção de K. De acordo com Galicia-Juárez et al. (2021), quando a cultura do sorgo é conduzida sob condições de redução da disponibilidade hídrica, ocorre diminuição na disponibilidade de nutrientes, uma vez que a redução da umidade do solo limita o transporte dos nutrientes do solo até os tecidos vegetais. No entanto, algumas cultivares de sorgo apresentam tolerância à escassez hídrica e conseguem manter a absorção nutricional normal até determinado nível de estresse hídrico.

Por outro lado, a disponibilidade de K é proporcional à umidade do solo, uma vez que a movimentação desse nutriente ocorre principalmente por difusão e depende do fluxo de água no interior da planta (Wang et al., 2013; Cunha et al., 2024). Além disso, a tolerância das plantas ao estresse hídrico está associada à absorção de K, pois a presença desse nutriente nos tecidos vegetais contribui para o ajuste osmótico, favorecendo a manutenção do turgor celular e aumentando a tolerância das plantas às condições de déficit hídrico (Cunha et al., 2024).

A maior absorção de Ca e Na observada no ambiente I, em comparação ao ambiente II, está relacionada à qualidade da água utilizada na irrigação, uma vez que a água empregada no ambiente I apresentava maiores concentrações de cálcio e sódio em relação à água utilizada no ambiente II.

Qualidade do caldo e produção de etanol

De modo geral, o estresse hídrico afetou apenas os teores de açúcares totais, açúcar recuperável total e a produção de etanol. Os açúcares totais atuam na proteção da planta contra o estresse. Nesse contexto, Aydinsakir et al. (2021) relataram que, sob níveis de irrigação deficitários, houve aumento na produção de frutose, sacarose e glicose, efeito associado a mecanismos fisiológicos de defesa da planta frente ao estresse abiótico.

Os tratamentos estresse nas fases II-III-IV e estresse nas fases II-III apresentaram as menores produções de etanol. Embora o estresse hídrico possa aumentar a concentração de açúcares no sorgo, os resultados indicam que o estresse aplicado nas fases mais sensíveis da

cultura reduz a produção de caldo, e essa redução se reflete diretamente na produção de etanol. Lira et al. (2023) e Silva et al. (2019), em estudos com a cultivar BRS 506, obtiveram produções médias de etanol de 3.015,3 L ha⁻¹ e 4.157,85 L ha⁻¹, respectivamente, valores superiores aos encontrados no presente estudo. Os baixos valores de produção de etanol observados estão associados a menores valores do °Brix, que pode ser reflexo da presença de insetos sugadores que surgiram no final do ciclo. Os valores de °Brix encontrados no presente estudo foram inferiores aos reportados por Lira et al. e Silva et al., resultado que pode estar atrelado às condições experimentais, como fatores climáticos e ocorrência de pragas.

O ambiente II apresentou produções de etanol, °Brix e sacarose superiores às observadas no ambiente I. Os valores mais baixos de °Brix no ambiente I estão relacionados aos níveis de salinidade da água utilizada, além de a ocorrência de pragas ter interferido no processo de maturação da cultura, reduzindo tanto a sacarose quanto o °Brix.

Os valores obtidos no ambiente II indicam que o estresse hídrico aplicado na fase IV aumentou a produção de etanol, reforçando a ideia de que a resposta do sorgo ao estresse abiótico depende tanto da intensidade quanto da fase de desenvolvimento. Plantas submetidas a estresses abióticos tendem a produzir maiores quantidades de açúcares, pois estes desempenham papel fundamental no ajuste osmótico e são essenciais para a adaptação do sorgo às condições de estresse abiótico (Sousa et al., 2024).

Os valores obtidos no presente estudo indicam que, além do estresse hídrico ser uma alternativa para reduzir custos na produção do sorgo, o etanol oriundo dessa cultura pode representar uma alternativa ao cultivo da cana-de-açúcar. Embora o rendimento tenha sido inferior ao relatado para a cana-de-açúcar (6000–10000 L ha⁻¹), o sorgo apresenta ciclo mais curto e menor demanda hídrica, tornando-se uma opção viável para a produção de etanol (Benjamin, García-Aparicio, & Görgens, 2014; Mokomele, da Costa Sousa, & Balan, 2018; Lira et al., 2023).

CONCLUSÃO

A aplicação de déficit hídrico em diferentes fases fenológicas reduz a produção de biomassa do sorgo sacarino, sendo a fase II a menos tolerante ao déficit hídrico, enquanto as fases III e IV são as mais tolerantes. Por outro lado, o nível de estresse de 50 % da ETc não afeta a nutrição da cultura.

O déficit hídrico pode reduzir a produção de caldo e de etanol do sorgo; entretanto, a imposição do estresse na fase IV mostra-se uma alternativa viável, pois permite manter a produtividade, ao mesmo tempo em que reduz o consumo de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghajani, S. D., Alavifazel, M., Nurmohammadi, G., Ardakani, M. R., & Sarajughi, M. (2023). Drought responsive biomarkers of sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as affected by biochar, planting arrangement and alternate furrow irrigation. *Plant Physiology Reports*, 28(2), 247–258.
- Amaral, S. R. D., Lira, M. D. A., Tabosa, J. N., Santos, M. V. F. D., Mello, A. C. L. D., & Santos, V. F. D. (2003). Comportamento de linhagens de sorgo forrageiro submetidas a déficit hídrico sob condição controlada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 973–979.
- Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., & Nazir, U. (2017). Growth and development responses of crop plants under drought stress: A review. *Zemdirbyste–Agriculture*, 104(3), 267–276.
- Aydinsakir, K., Buyuktas, D., Dinç, N., Erdurmus, C., Bayram, E., & Yegin, A. B. (2021). Yield and bioethanol productivity of sorghum under surface and subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 243, 106452. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106452>
- Benjamin, Y., García-Aparicio, M. P., & Görgens, J. F. (2014). Impact of cultivar selection and process optimization on ethanol yield from different varieties of sugarcane. *Biotechnology for Biofuels*, 7, 60. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-60>
- Bista, D. R., Heckathorn, S. A., Jayawardena, D. M., Mishra, S., & Boldt, J. K. (2018). Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and tolerant grasses. *Plants*, 7(2), 28. <https://doi.org/10.3390/plants7020028>
- Boomiraj, K., Wani, S. P., & Agrawal, P. K. (2011). Impact of climate change on rainfed sorghum in India. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 81(5), 444–450.
- CONSECANA-Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (2006) Manual de Instruções. 5ª edição. Piracicaba
- Cunha, T. L. D. O., Santana, D. C., Theodoro, G. D. F., Seron, A. C. D. S. C., Cunha, F. F. D., Teodoro, P. E., & Montañó, A. S. (2024). Effect of water deficit on secondary metabolites and nutrient content of forage sorghum. *Agronomy*, 14(9), 2046. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092046>

- Domínguez, A., De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Martínez, R. S., & Martínez-Romero, A. (2012). Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 67–77a. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.003>
- Fardin, F., Sani, B., Moaveni, P., Afsharmanesh, G., & Mozafari, H. (2023). Nutritional value and agronomic characteristics of forage sorghum under water stress. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 48, 102624. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102624>
- Galicia-Juárez, M., Zavala-García, F., Sinagawa-García, S. R., Gutiérrez-Diez, A., Williams-Alanís, H., Cisneros-López, M. E., & Santillano-Cázares, J. (2021). Identification of sorghum genotypes (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) with potential tolerance to water and heat stress in northeastern Mexico. *Plants*, 10(11), 2265. <https://doi.org/10.3390/plants10112265>
- Golzardi, F., Baghdadi, A., & Afshar, R. K. (2017). Alternate furrow irrigation affects yield and water-use efficiency of maize under deficit irrigation. *Crop and Pasture Science*, 68(8), 726–734. <https://doi.org/10.1071/CP17063>
- He, M., & Dijkstra, F. A. (2014). Drought effect on plant nitrogen and phosphorus: A meta-analysis. *New Phytologist*, 204(4), 924–931. <https://doi.org/10.1111/nph.12952>
- Hsiao, T. C., Fereres, E., Acevedo, E., & Henderson, D. W. (1976). Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. In O. L. Lange, L. Kappen, & E. D. Schulze (Eds.), *Water and plant life* (pp. 281–305). Springer.
- Kirchner, J. H., Robaina, A. D., Peiter, M. X., Torres, R. R., Mezzomo, W., & Ben, L. H. B. (2019). Funções de produção e eficiência no uso da água em sorgo forrageiro irrigado. *Revista Agrária*, 14(2), 1–9. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i2a5646>
- Lino, V. A. S., Medeiros, J. F., Costa, A. R. F. C., Costa, S. C., Silva, M. V. T., & Silva, F. K. K. (2020). Uso de água com alta concentração de sal na produção de sorgo no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 19, e1134. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms2020.v19.e1134>
- Lira, RB, Ferreira-Neto M, Da Silva Dias N, De Medeiros JF, De Brito RF, De Lemos M, et al. Biomassa, rendimento de grãos, produção de etanol e cogeração de energia do sorgo sacarino irrigado com efluente de esgoto doméstico. *Biomass Conv Bioref.* 2023;13(10):9131–40. doi: [10.1007/s13399-021-01894-z](https://doi.org/10.1007/s13399-021-01894-z) .
- Mokomele, T., da Costa Sousa, L., Balan, V., & et al. (2018). Potencial de produção de etanol a partir de resíduos de cana-de-açúcar tratados com AFEX™ e explosão a vapor para biorrefinarias de cana-de-açúcar. *Biotechnology for Biofuels*, 11, 127. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1130-z>
- Naoura, G., Emendack, Y., Baloua, N., Vom Brocke, K., Hassan, M. A., Sawadogo, N., Trouche, G., & Laza, H. E. (2020). Characterization of semi-arid sweet sorghum accessions

from Chad as potential sources for sugar and ethanol production. *Scientific Reports*, 10(1), 14947. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71506-9>

Rakshit, S., Swapna, M., Dalal, M., Sushma, G., Ganapathy, K. N., Dhandapani, A., & Talwar, H. S. (2016). Post-flowering drought stress response of post-rainy sorghum genotypes. *Indian Journal of Plant Physiology*, 21(1), 8–14. <https://doi.org/10.1007/s40502-015-0189-9>

L. A. Richards RICHARDS, L. A. Methods of measuring soil moisture tension. *Soil Science*, Baltimore, v. 68, n. 2, p. 95–112, 1949.

Santos, Hg Dos ; Jacomine, Pkt ; Anjos, Lhc Dos ; Oliveira, Va De ; Lumbrras, Jf ; Coelho, Mr ; Almeida, Ja De ; Araújo Filho, Jc De ; Lima, Hn ; Marques, Fa ; Oliveira, Jb De ; Cunha, TJF. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS). 6.ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2025. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176834/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>

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. (2023). Ionic response and production of sorghum under water and saline stress in a semi-arid environment. *Agriculture*, 13(6), 1127. <https://doi.org/10.3390/agriculture13061127>

Silva, R. R. D., Queiroz, G. C. M. D., Sousa, A. C. D. P., Souto, A. G. D. L., Andrade, F. H. A. D., Morais, F. M. D. S., & Medeiros, J. F. D. (2025). Tolerance of sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) to water deficit and irrigation water salinity. *Phyton*, 94(9).

Tavazoh, M., Habibi, D., Golzardi, F., Ilkaee, M. N., & Paknejad, F. (2024). Effects of water stress on morphophysiological traits, nutritive value, and water-use efficiency of sorghum varieties under different irrigation systems. *Brazilian Journal of Biology*.

Tovignan, T. K., Basha, Y., Windpassinger, S., Augustine, S. M., Snowdon, R., & Vukasovic, S. (2023). Precision phenotyping of agro-physiological responses and water use of sorghum under different drought scenarios. *Agronomy*, 13(3), 722. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030722>

Wang, M., Zheng, Q., Shen, Q., & Guo, S. (2013). The critical role of potassium in plant stress response. *International Journal of Molecular Sciences*, 14, 7370–7390. <https://doi.org/10.3390/ijms14047370>

Ye, C., Zheng, G., Tao, Y., Xu, Y., Chu, G., Xu, C., & Wang, D. (2024). Effect of soil texture on soil nutrient status and rice nutrient absorption in paddy soils. *Agronomy*, 14(6), 1339. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061339>

Zheng, M. Y., Zhu, P., Zheng, J. Y., Xue, L., Zhu, Q. F., Cai, X. J., Cheng, S., Zhang, Z. F., Kong, F. Y., & Zhang, J. G. (2021). Effects of soil texture and nitrogen fertilization on soil bacterial community structure and nitrogen uptake in flue-cured tobacco. *Scientific Reports*, 11, 22643. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02067-5>

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R.; RAES, D.; SMITH, M.; KILIC, A.; SALMAN, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop**

water requirements. 2. ed., rev. Rome: FAO, 2025. 440 p. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56 Rev.1. <https://doi.org/10.4060/cd6621en>.

Nelson, N. (1944). Uma adaptação fotométrica do método de Somogyi para a determinação de glicose. *J. biol. Chem* , 153 (2), 375-380.

Somogyi, M. (1952). Notas sobre a determinação de açúcar. *Journal of biological chemistry* , 195 (1), 19-23.

Zhao, H., Zhang, R., Yan, X. & Fan, K. Nanoenzimas de superóxido dismutase: uma estrela emergente para a antioxidante. *J. Mater. Chem.* **9**, 6939–6957 (2021)

Mahdavian, M., Shahpiri, A., Shamsara, M., & Zarei, M. (2025). Rastreamento da superóxido dismutase de cobre-zinco e manganês em *Avicennia marina* revela expressão dependente do tempo de isoformas de SOD em resposta ao estresse de sal e chumbo. *Scientific Reports* , 15 (1), 42608.