

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

STEFFANY DAIANA DA COSTA BERTO

**EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO SILICATADA NA
MORFOFISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DA CANA-SOCA SOB
ESTRESSE HÍDRICO**

RECIFE

2025

Steffany Daiana da Costa Berto

Engenheira Agrônoma

Efeito residual de adubação silicatada na morfofisiologia e bioquímica da cana-soca sob estresse hídrico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador:

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Coorientadores: Prof. Dr. Clístenes Williams A. do Nascimento

**Recife
2025**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

B545e Berto, Steffany Daiana da Costa.

Efeito residual de adubação silicatada na morfofisiologia e bioquímica da cana-soca sob estresse hídrico / Steffany Daiana da Costa Berto. – Recife, 2025. 132 f.; il.

Orientador(a): Edivan Rodrigues de Souza.

Co-orientador(a): Clístenes Williams Araújo do Nascimento.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências.

1. Fotossíntese. 2. Estresse (Fisiologia). 3. Plantas - Nutrição . 4. Cana-de-açúcar - Relações hídricas 5. Cana-de-açúcar. I. Souza, Edivan Rodrigues de, orient. II. Nascimento, Clístenes Williams Araújo do, coorient. III. Título

CDD 631.4

STEFFANY DAIANA DA COSTA BERTO

Efeito residual de adubação silicatada na morfofisiologia e bioquímica da cana-soca sob estresse hídrico

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 24 de 02 de 2025

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Airon José da Silva

Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Ygor Jacques Agra Bezerra da Silva

Universidade Federal Rural de Pernambuco

DEDICO

Aos meus pais, Maria Ponciana e Silvano Berto, ao meu irmão Sheldon, a minha sobrinha Stella Maria, as minhas avós Severina (in memoriam), Lenice e Marina (in memoriam), aos meus avós José Sebastião e Cícero, ao meu namorado José Edson.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por me guiar, proteger, permitir e iluminar meus caminhos.

Aos meus pais, Silvano Berto Silva e Maria Ponciana Costa Berto, pelo amor incondicional, sabedoria, conselhos e conversas, por me apoiarem ao longo de minha vida e por todo esforço para tornar seus filhos pessoas dignas de respeito.

Ao meu namorado, Dr. José Edson, agradeço por todo apoio ao longo do mestrado, me auxiliando em cada detalhe, pelo incentivo, amor, conselhos e parceria. Por compartilhar sonhos, conquistas e desafios comigo.

Ao Prof^o Edivan pela orientação neste trabalho, ao Dr. Lucas por toda ajuda nas análises e sugestões em pró deste trabalho. A todos os integrantes do grupo Solo-Água-Planta (SAP), Fabiano, Nino, Martha, Alfredo, Allef, Diana e Wellinton pela convivência diária.

Ao meu amigo e técnico do laboratório de física do solo, Eudes, por toda ajuda no laboratório e conselhos. Aos meus amigos e conhecidos do Laboratório de Física do Solo (LaFis) Talmo, Paulo, Edilson, Alison, Ana Lua, Victor por ajuda, troca de conhecimentos e risadas.

As minhas amigas Larissa e Analice, por todas as conversas, distrações, trocas de conhecimentos e apoio. A Paulo Dias por todo auxílio no laboratório de química e ajuda durante as disciplinas. Aos amigos que o programa me trouxe Lohana, Taciana, André e Daniel, por todas as descontrações e troca de apanhados ao longo das disciplinas.

Ao programa de Pós-graduação em Ciências do Solo e a Universidade Federal Rural de Pernambuco por proporcionar novos horizontes, oportunidades, experiências, infraestrutura e apoio técnico. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), que apoia o presente trabalho por meio do Código de Financiamento 001.

Aos demais parentes e amigos pelas palavras de apoio, incentivo e amizade.

MUITO OBRIGADA!

“O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim, terás o que colher.”

Cora Coralina

Efeito residual de adubação silicatada na morfofisiologia e bioquímica da cana-soca sob estresse hídrico

RESUMO GERAL

O uso do silício (Si) tem se destacado como um recurso eficaz na redução dos impactos do estresse hídrico em plantas. No entanto, ainda há a necessidade de investigar as fontes, efeitos residuais e as doses ideais para a cultura da cana-de-açúcar. Nesse sentido, essa pesquisa teve como objetivo avaliar as respostas fisiológicas, nutricionais e de crescimento da cultura ao efeito residual do fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA) na mitigação dos danos causados pelo estresse hídrico em cana-soca. O experimento foi conduzido em blocos inteiramente casualizados com esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições, durante um período de 150 dias após o corte (DAC) correspondente a quatro doses residuais de fertilizante derivado de sílica amorfa, correspondente a 0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹ de Si e dois níveis de umidade do solo (40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água). Realizaram-se avaliações nos parâmetros de crescimento (altura - AC e diâmetro de colmo - DC, número de plantas - NP e área foliar - AF), biomassa (massa fresca -MFF e massa seca das folhas - MSF; massa fresca - MFC e massa seca do colmo - MSC), bioquímicos (fluorescência da clorofila, eficiência quântica fotoquímica - Fv/Fm, quantificação de clorofila - Chl *a+b* e carotenoides), fisiológicos (relações hídricas e trocas gasosas) e nutricionais (teores de Si, N, P, K e C na planta). O regime hídrico de 80% da CMRA com dose de 156 kg ha⁻¹ promoveu aumentos na AC (+27,60%), DC (+5,87%), AF (+126,10%), MSF (+34,05%) e MSC (+78,40%) em comparação à 40% da CMRA. Aos 140 DAC a razão Fv/Fm apresentou valores de 0,66 e 0,71 para 40 e 80% da CMRA, respectivamente, na dose de 156 kg ha⁻¹. Os teores de Chl *a+b* apresentaram aumentos de 66,28% (40% da CMRA) e 55,21% (80% da CMRA) na dose 156 kg ha⁻¹ comparada à 0 kg ha⁻¹. Aos 140 DAC o regime hídrico de 80% da CMRA com 156 kg ha⁻¹ promoveu aumentos na fotossíntese (+16,93%), transpiração (+25,35%) e concentração interna de CO₂ (+34,46%), em relação a 40% CMRA. Os teores foliares de Si foram 2,47 e 6,64 g kg⁻¹ para as doses 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente. A dose de 156 kg ha⁻¹ combinada com 40% da CMRA promoveu aumento nos teores de N (+27,14%), P (+84,60%) comparada a dose de 0 kg ha⁻¹. A ordem de extração e exportação de macronutrientes e Si pela variedade RB041443 foi: K > N > Si > Ca > P > Mg em ambas CMRA. Conclui-se que o efeito residual das doses crescentes de silício atenuou os impactos do estresse hídrico na cana-soca, promovendo ajustamento osmótico, redução no extravasamento de eletrólitos e potencial hídrico foliar, melhorias nas trocas gasosas, pigmentos fotossintéticos e fluorescência da clorofila, maior acúmulo de biomassa e elevação dos teores foliares de nutrientes. Esses resultados oferecem base técnica para aprimorar o manejo sustentável da cana-de-açúcar em regiões com distribuição pluviométrica irregular, refletindo em maior tolerância ao déficit hídrico e melhor desempenho produtivo.

Palavras-chaves: Eficiência fotossintética. Estresse abiótico. Nutrição de plantas. Relações hídricas. *Saccharum officinarum* L.. Sílica amorfa.

Residual effect of silicate fertilizer on the morphophysiology and biochemistry of ratoon sugarcane under water stress

GENERAL ABSTRACT

The use of silicon (Si) has stood out as an effective tool for reducing the impacts of water stress on plants. However, there is still a need to investigate the sources, residual effects and ideal doses for sugarcane cultivation. In this sense, this research aimed to evaluate the physiological, nutritional and growth responses of the crop to the residual effect of fertilizer derived from amorphous silica (FSA) in mitigating the damage caused by water stress in ratoon sugarcane. The experiment was conducted in randomized blocks with a 4 x 2 factorial scheme, with four replications, during a period of 150 days after cutting (DAC) corresponding to four residual rates of fertilizer derived from amorphous silica, corresponding to 0.0; 78.0; 117.0, and 156.0 kg ha⁻¹ of Si and two levels of soil moisture (40% and 80% of the maximum water retention capacity). Evaluations were carried out on growth parameters (height - SH and stalk diameter - SD, number of plants - NP and leaf area - LA), biomass (fresh mass - LFM and leaves dry mass - LDM; fresh mass - SFM, and stalk dry mass - SDM), biochemical (chlorophyll fluorescence, photochemical quantum efficiency - Fv/Fm, chlorophyll quantification - Chl a+b and carotenoids), physiological (water relations and gas exchange) and nutritional (Si, N, P, K and C in the plant). The water regime of 80% of MWRC with a dose of 156 kg ha⁻¹ promoted increases in SH (+27.60%), SD (+5.87%), LA (+126.10%), LDM (+34.05%) and SDM (+78.40%), respectively, compared to 40% of MWRC. At 140 DAC the Fv/Fm ratio presented values of 0.66 and 0.71 for 40 and 80% of MWRC, respectively, at a dose of 156 kg ha⁻¹. Chl a+b levels showed increases of 66.28% (40% of MWRC) and 55.21% (80% of MWRC) at a rate of 156 kg ha⁻¹ compared to 0 kg ha⁻¹. At 140 DAC, the water regime of 80% of MWRC with 156 kg ha⁻¹ promotes increases in photosynthesis (+16.93%), transpiration (+25.35%) and internal CO₂ concentration (+ 34.46%), in relation to 40% MWRC. The leaf Si contents were 2.47 and 6.64 g kg⁻¹ for rates 0 and 156 kg ha⁻¹, respectively. A rate of 156 kg ha⁻¹ combined with 40% MWRC promoted an increase in contents of N (+27.14%), P (+84.60%) compared to a rate of 0 kg ha⁻¹, respectively. The order of extraction and export of macronutrients and Si by the variety RB041443 was: K > N > Si > Ca > P > Mg, in both MWRC. It is concluded that the residual effect of increasing silicon rates mitigated the impacts of water stress in ratoon sugarcane by promoting osmotic adjustment, reducing electrolyte leakage and leaf water potential, and improving gas exchange, photosynthetic pigments, and chlorophyll fluorescence. These effects contributed to greater biomass accumulation and increased foliar nutrient content. These findings provide a technical basis for improving the sustainable management of sugarcane in regions with irregular rainfall distribution, resulting in greater drought tolerance and improved crop performance.

Keywords: Photosynthetic efficiency. Abiotic stress. Plant nutrition. Water relations. *Saccharum officinarum* L.. Amorphous silica.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II: SILÍCIO MITIGA O EFEITO DE DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-SOCA EM FUNÇÃO DA MELHORIA NO POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR, AJUSTAMENTO OSMÓTICO E BIOMASSA.....	34
Figura 1 – Casa de vegetação utilizada na condução do experimento.....	38
Figura 2 – Layout da área experimental, destacando as distribuições das lâminas de irrigação e doses de Si.....	39
Figura 3 – Superfície de resposta da altura do colmo da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água.....	45
Figura 4 – Superfície de resposta do diâmetro do colmo da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água.....	46
Figura 5 – Superfície de resposta do número de plantas da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água.....	47
Figura 6 – Superfície de resposta da área foliar da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetida a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água.....	48
Figura 7 – Massa fresca das folhas (A), massa fresca do colmo (B) massa fresca total da planta (C) da cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	50
Figura 8 – Potencial hídrico na antemanhã (A), potencial hídrico ao meio-dia (B), potencial osmótico na antemanhã (C) e potencial osmótico ao meio-dia (D), potencial de pressão foliar (E) da cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	52
Figura 9 – Ajustamento osmótico total (A), teor relativo de água (B), suculência foliar (C) e extravasamento de eletrólitos (D) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	54
CAPÍTULO III: PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DA CANA-SOCA EM FUNÇÃO DO EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO SILICATADA.....	62
Figura 1 – Dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar ao longo do período experimental de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	66

Figura 2 – Lâmina de irrigação aplicada ao longo do período experimental de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	68
Figura 3 – Fluorescência inicial (A, B e C) aos 80, 110 e 140 dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	72
Figura 4 – Fluorescência máxima aos 80 (A e B), 110 (C e D) e 140 (E) dias após o corte em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	73
Figura 5 – Fluorescência variável aos 80 (A e B), 110 (C e D) e 140 (E) dias após o corte em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	75
Figura 6 – Eficiência quântica fotoquímica do fotossistema II aos 80 (A e B), 110 (C e D) e 140 (E) dias após o corte em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	77
Figura 7 – Clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	79
Figura 8 – Fotossíntese líquida - A aos 80 (A), 110 (B) e 140 (C) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	83
Figura 9 – Condutância estomática (gs) aos 80 (A), 110 (B e C) e 140 (D) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	85
Figura 10 – Transpiração foliar (E) aos 80 (A e B), 110 (C) e 140 (D) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	86
Figura 11 – Concentração interna de CO ₂ (C _i) aos 110 (A) e 140 (B) e eficiência instantânea de uso de água (EUA) aos 110 (C) e 140 (D) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	88
 CAPÍTULO IV: EFEITO RESIDUAL DE FERTILIZAÇÃO SILICATADA EM CANA-SOCA SOB DÉFICIT HÍDRICO: BIOMASSA, NUTRIÇÃO E RAZÕES ESTEQUIOMÉTRICAS DE NUTRIENTES.....	
Figura 1 – Representação da estrutura do Lisímetro.....	99
Figura 2 – Massa seca das folhas (A), seca do colmo (B), massa seca total da planta (C) da cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	104

Figura 3 – Teores foliares de nitrogênio total (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e carbono orgânico total (F) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	107
Figura 4 – Teores foliares de silício (Si) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si (A) e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água (B).....	110
Figura 5 – Razões carbono orgânico:nitrogênio total (A), carbono orgânico:fósforo (B e C), nitrogênio total:fósforo (D) e carbono orgânico:silício (E) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	113
Figura 6 – Extração e exportação de nitrogênio (A e B), fósforo (C e D) e potássio (E e F), respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	117
Figura 7 – Extração e exportação de cálcio (A e B) e magnésio (C e D), respectivamente, de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	119
Figura 8 – Extração e exportação de silício (A e B), respectivamente, de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....	120
Figura 9 – Teores de silício em solo cultivado com cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% da capacidade máxima de retenção de água (B).....	123

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II: SILÍCIO MITIGA O EFEITO DE DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-SOCA EM FUNÇÃO DA MELHORIA NO POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR, AJUSTAMENTO OSMÓTICO E BIOMASSA.....34

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do Argissolo Amarelo Distrocioso utilizado no experimento.....41

Tabela 2 – Resumo da análise multivariada para às variáveis altura de colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), número de plantas (NP) e área foliar (AF) em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....45

Tabela 3 – Análise de variância para massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do colmo (MFC) e massa fresca total da planta (MFT) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....49

Tabela 4 – Análise de variância para o potencial hídrico (Ψ_w), potencial osmótico (Ψ_s) e potencial de pressão foliar (Ψ_p) na antemã e ao meio-dia em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....51

Tabela 5 – Análise de variância para o ajustamento osmótico total (AOt), extravasamento de eletrólitos (EE), teor relativo de água (TRA) e suculência foliar (SF) em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....53

CAPÍTULO III: PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DA CANA-SOCA EM FUNÇÃO DO EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO SILICATADA.....62

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do Argissolo Amarelo Distrocioso utilizado no experimento.....67

Tabela 2 – Análise de variância para fluorescência inicial (F_o), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável (F_v), eficiência quântica fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m) em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....70

Tabela 3 – Análise de variância para clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b), clorofila total (Chl a+b) e carotenoides em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....78

Tabela 4 – Análise de variância para fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (G_s), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência instantânea no uso de água (EUA), em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....81

CAPÍTULO IV: EFEITO RESIDUAL DE FERTILIZAÇÃO SILICATADA EM CANA-SOCA SOB DÉFICIT HÍDRICO: BIOMASSA, NUTRIÇÃO E RAZÕES ESTEQUIOMÉTRICAS DE NUTRIENTES.....94

Tabela 1 – Propriedades químicas do FSA (Agrisilica® Granules, NSW, Austrália).....100

Tabela 2 – Análise de variância para massa seca das folhas (MSF), massa seca do colmo (MSC) e massa seca total da planta (MST) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....103

Tabela 3 – Análise de variância para os teores de nitrogênio total (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si) e carbono orgânico total (C) em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....106

Tabela 4 – Análise de variância para as razões carbono orgânico:nitrogênio total (C:N), carbono orgânico:fósforo (C:P), carbono orgânico:silício (C:Si) e nitrogênio total:fósforo (N:P) em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....112

Tabela 5 – Análise de variância para extração e exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si) e carbono orgânico total (C) em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água.....115

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1 Hipóteses	18
1.2 Objetivos.....	18
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	18
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	18
2. CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Cana-de-açúcar: aspectos gerais	20
2.2 Cana-de-açúcar: importância social e econômica	20
2.3 Regime hídrico na cana-de-açúcar	21
2.4 Efeitos do estresse hídrico na cana-de-açúcar	22
2.5 Utilização do silício na agricultura	22
2.6 Sílica amorfa como fonte de Si.....	24
2.7 Uso do silício para mitigação do estresse hídrico	24
2.8 Recuperação do silício em colheitas sucessivas de cana-de-açúcar	25
Referências Bibliográficas	27
3. CAPÍTULO II: SILÍCIO MITIGA O EFEITO DE DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-SOCA EM FUNÇÃO DA MELHORIA NO POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR, AJUSTAMENTO OSMÓTICO E BIOMASSA	34
3.1 Introdução	36
3.2 Material e Métodos.....	38
3.2.1 <i>Local do experimento e caracterização das unidades experimentais</i>	38
3.2.2 <i>Tratamentos e delineamento experimental</i>	39
3.2.3 <i>Manejo da irrigação</i>	40
3.2.4 <i>Breve histórico do primeiro cultivo da cana-planta</i>	41
3.2.5 <i>Avaliações na cana-soca</i>	41
3.2.6 <i>Altura de colmo, diâmetro do colmo, número de plantas e área foliar</i>	41
3.2.7 <i>Potencial hídrico e potencial osmótico</i>	42
3.2.8 <i>Ajustamento osmótico, extravasamento eletrólitos, teor relativo de água e suculência foliar</i>	43
3.2.9 <i>Produção de massa fresca</i>	44
3.2.10 <i>Análise estatística</i>	44
3.3 Resultados e Discussão.....	44

3.3.1 <i>Altura do colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), número de plantas (NP) e área foliar (AF)</i>	44
3.3.2 <i>Produção de massa fresca</i>	48
3.3.3 <i>Relações hídricas</i>	50
3.4 <i>Conclusões</i>	56
Referências Bibliográficas	57
4. CAPÍTULO III: PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DA CANA-SOCA EM FUNÇÃO DO EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO SILICATADA.....	62
4.1 <i>Introdução</i>	64
4.2 <i>Material e Métodos</i>	66
4.2.1 <i>Área de estudo e caracterização das unidades experimentais</i>	66
4.2.2 <i>Design experimental</i>	67
4.2.3 <i>Manejo da hídrico</i>	68
4.2.4 <i>Avaliações na cana-soca</i>	69
4.2.4.1 <i>Fluorescência da clorofila</i>	69
4.2.4.2 <i>Pigmentos fotossintéticos</i>	69
4.2.4.3 <i>Trocas gasosas foliares</i>	69
4.2.5 <i>Análise estatística</i>	69
4.3 <i>Resultados e Discussão</i>	70
4.3.1 <i>Fluorescência da clorofila a</i>	70
4.3.2 <i>Pigmentos fotossintéticos</i>	78
4.3.3 <i>Trocas gasosas foliares</i>	81
4.4 <i>Conclusões</i>	88
Referências Bibliográficas	90
5 CAPÍTULO IV: EFEITO RESIDUAL DE FERTILIZAÇÃO SILICATADA EM CANA-SOCA SOB DÉFICIT HÍDRICO: BIOMASSA, NUTRIÇÃO E RAZÕES ESTEQUIOMÉTRICAS DE NUTRIENTES	94
5.1 <i>Introdução</i>	96
5.2 <i>Material e Métodos</i>	98
5.2.1 <i>Caracterização do local</i>	98
5.2.2 <i>Montagem do experimento e histórico do cultivo inicial da cana-planta</i>	98
5.2.3 <i>Tratamentos e delineamento experimental</i>	99
5.2.4 <i>Manejo da irrigação</i>	100
5.2.5 <i>Variáveis analisadas</i>	101

5.2.5.1 <i>Produção de massa seca</i>	101
5.2.5.2 <i>Diagnose foliar</i>	101
5.2.5.3 <i>Extração e exportação de macronutrientes e Si</i>	102
5.2.5.3 <i>Teor de Si no solo</i>	102
5.2.6 <i>Análise estatística</i>	103
5.3 Resultados e Discussão.....	103
5.3.1 <i>Produção de massa seca</i>	103
5.3.2 <i>Análise nutricional</i>	105
5.3.2.1 <i>Diagnose foliar</i>	105
5.3.2.2 <i>Razões estequiométricas C:N:P:Si em folhas</i>	111
5.3.2.3 <i>Extração e exportação de nutrientes</i>	115
5.3.4 <i>Teor de Si no solo</i>	122
5.4 Conclusões.....	124
Referências Bibliográficas	125
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	131

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. De acordo com a CONAB (2024), na safra 2023/2024, a produção no país foi de 713,21 milhões de toneladas. Dentro desse total, Pernambuco contribuiu com 13,81 milhões de toneladas. Dessa forma, a indústria da cana-de-açúcar, que abrange a produção de insumos, atividades primárias, indústria e serviços, contribui com 2,17% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e gera aproximadamente 2,4 milhões de postos de trabalho diretos e indiretos.

A cana-de-açúcar se adapta a diversas condições edafoclimáticas. Durante seu ciclo vegetativo, requer uma faixa de precipitação pluviométrica entre 1500 a 2500 mm. Embora a Região Nordeste possua uma faixa de precipitação pluviométrica abaixo da exigida pela cultura, a Região é uma grande produtora de cana-de-açúcar, sob regime de sequeiro, onde apresentou produtividade média na safra 2023/2024 de 63,9 Mg ha⁻¹, abaixo da nacional (85,6 Mg ha⁻¹) (CONAB, 2024). Ainda de acordo com levantamento em Pernambuco apenas 15% dos canaviais do estado dispõem de algum tipo de sistema de irrigação.

Os estresses ambientais reduzem consideravelmente as produtividades globais das culturas e atingem mais de 50% da produção mundial (ROORKIWAL et al., 2020). O déficit hídrico é particularmente prejudicial e representa uma ameaça para a agricultura global, afetando significativamente a produção de cana-de-açúcar.

O problema da escassez hídrica dificulta o crescimento, desenvolvimento e a taxa de assimilação fotossintética de CO₂ nas plantas de cana-de-açúcar, sendo as fases de perfilhamento e de crescimento as mais críticas devido à maior necessidade de água. Estudos dos autores Inman-Bamber, Lakshmanan e Park (2012), Inman-Bamber e Smith (2005), Jasmine, Ahamed e Biswas (2022) demonstram que o déficit hídrico na cana-de-açúcar causa fechamento dos estômatos, o enrolamento das folhas, a inibição do crescimento de caules e folhas, senescência foliar, redução da área foliar, bem como a diminuição do potencial hídrico das folhas e o acúmulo de prolina.

Nesse contexto de estresse hídrico, a presença de certos elementos, como o silício (Si), pode desempenhar um papel importante na mitigação dos estresses causados. O elemento Si é amplamente distribuído na crosta terrestre, porém na sua maioria é indisponível para as plantas. Os solos contêm baixa disponibilidade de Si para as plantas, encontrados na forma de dióxido de Si (SiO₂) e ácido monossilícico (H₄SiO₄). Diversas culturas, como arroz, cana-de-açúcar, trigo e outras, acumulam Si em sua estrutura. A cana é uma das culturas que mais retira Si dos solos, chegando a 700 kg por hectare (MAJUMDAR; PRAKASH, 2020).

Embora o Si não seja essencial para o crescimento das plantas, é reconhecido como benéfico, desempenhando um papel importante na mitigação de estresses abióticos, como salinidade, déficit hídrico, toxicidade de metais pesados e deficiência de nutrientes, além de proporcionar manejo mais adequado e reduzir a necessidade de pesticidas e fungicidas (COSTA et al., 2022; RAZA et al., 2023). Estudos têm demonstrado que fertilizante compostos com sílica amorfa oriunda de rochas sedimentares são eficientes na disponibilidade de Si, em razão da sua maior solubilidade (NASCIMENTO et al., 2023; NASCIMENTO et al., 2021).

A cana-de-açúcar apresenta alta extração de nutrientes do solo devido a sua elevada produção de biomassa da parte aérea, além disso, a cada colheita há uma exportação significativa pelos seus colmos. Por ser uma planta acumuladora de Si, estudos demonstraram que a dosagem de Si é recuperada logo no segundo ciclo de cultivo da cana-de-açúcar (CAMARGO; KEEPING, 2021; CAMARGO, ROCHA; BALTIERI, 2021), indicando uma tendência de esgotamento do solo se não realizada a reposição do elemento por meio de um manejo adequado de fertilização durante ciclos sucessivos.

1.1 Hipóteses

Portanto, surgem as seguintes hipóteses: (a) a aplicação de Si em cana-planta sob estresse hídrico promove o aumento da biomassa no ciclo consecutivo de cana-soca; (b) os mecanismos benéficos do efeito residual do Si em cana-soca decorrem de melhorias nas relações hídricas da cultura, incluindo aumento no ajustamento osmótico e no teor relativo de água; (c) a fertilização com Si aumenta as concentrações de pigmentos fotossintéticos, melhorando a eficiência fotossintética em condições de déficit hídrico; (d) o efeito residual do Si pode ter efeitos sinérgicos com outros nutrientes presentes no solo, potencializando a resposta positiva da cana-soca em condições de déficit hídrico.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos residuais das doses do fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA) aplicadas em cana-planta no ciclo sucessivo de cana-soca sob estresse hídrico.

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Mensurar o desempenho agrônômico com base no crescimento (altura e diâmetro de colmo, número de plantas, número de folhas e área foliar) e produção de biomassa (massa verde e seca) da cana-soca sob estresse hídrico e efeito residual do Si;

b) Determinar as respostas fisiológicas e bioquímicas por meio das trocas gasosas (fotossíntese líquida, transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO₂, eficiência instantânea de uso de água e eficiência instantânea de carboxilação), relações hídricas (potencial hídrico, potencial osmótico, potencial de pressão, conteúdo relativo de água), fluorescência da clorofila e pigmentos fotossintéticos (clorofila e carotenoides);

c) Quantificar os teores nutricionais nas plantas (N, P, K, Ca, Mg, Si e C orgânico), extração e exportação de macronutrientes e Si, quantificar o teor de Si no solo, da cana-soca sob estresse hídrico e efeito residual do Si.

2. CAPÍTULO I: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar: aspectos gerais

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma planta monocotiledônea, alógama e semiperene que pertence à classe Liliopsida, ordem Poales, família Poaceae e gênero *Saccharum*, sendo descrita taxonomicamente, por Linnaeus, em 1753. A planta é originária da ilha de Papua, na Nova Guiné, de onde expandiu-se para outras regiões do mundo com as migrações náuticas (DOORENBOS; KASSAM, 1979). As variedades modernas são híbridos provenientes de cruzamentos genéticos das espécies *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (CARNEIRO, 2017).

Por ser uma planta com metabolismo C4, apresenta a enzima PEPcarboxilase nas células do mesofilo foliar, o que aumenta a eficiência de fixação do CO₂, além de possuir alta eficiência fotossintética a ponto luminoso elevado (ABDELHAKIM et al., 2022; MARQUARDT et al., 2021). Aliado a isso, a demanda crescente por energias limpas e renováveis tem incentivado a sua expansão devido a sua alta capacidade de aproveitamento de resíduos, geração de combustível renovável e elevada taxa de fixação de CO₂ atmosférico, reduzindo o impacto ambiental do sistema de produção (CARPANEZ et al., 2022; PALACIOS-BERECHE et al., 2022), tornando-a uma das principais “commodities” agrícolas mundiais (SANTOS et al., 2020).

2.2 Cana-de-açúcar: importância social e econômica

A cana-de-açúcar é cultivada em mais 100 países, em uma área de aproximadamente 25,83 milhões de hectares. Cerca de 80% da produção encontra-se concentrada em dez países: Brasil, Índia, China, México, Tailândia, Paquistão, Colômbia, Austrália, Indonésia e Estados Unidos (FAO, 2019; SANTOS et al., 2020). O Brasil destaca-se no cenário agrícola, ocupando a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar. De acordo com a CONAB (2024) na safra 2024/2025 a estimativa de área colhida no país é de 8,7 milhões de hectares, indicando uma produção de 678,67 milhões de toneladas, correspondentes a 31,22% e 45,04% do total mundial, respectivamente.

O Estado de São Paulo é o maior produtor com 4,3 milhões de hectares (49,4%), seguido por Goiás com 978,6 mil hectares (11,3%), Minas Gerais com 958,0 mil hectares (11,0%), Mato Grosso do Sul com 675,1 mil hectares (7,8%), Paraná com 491,5 mil hectares (5,6%), Alagoas com 309,7 mil hectares (3,6%) e Pernambuco com 247,5 mil hectares (2,8%) (CONAB, 2024). Assim, a cadeia produtiva da cana (insumos, atividades primárias, indústria e serviços)

responde por 2,17% do PIB do país, gerando cerca de 2,4 milhões de empregos diretos e indiretos, distribuídos em 370 unidades produtoras e nos mais de 70 mil fornecedores independentes.

2.3 Regime hídrico na cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é cultivada em regiões tropicais e subtropicais de mais de 100 países, difundida em uma ampla faixa de latitude de 35 °N e 30 °S, adaptando-se a diversas condições edafoclimáticas. No entanto, exige precipitações pluviométricas entre 1500 e 2500 mm por ciclo vegetativo (DOORENBOS; KASSAM, 1979; FAO, 2019).

A Região Nordeste do Brasil abrange uma área de 1,56 milhões de km² (18,27% do território nacional), deste total, 61,7% correspondem ao Semiárido que é caracterizado principalmente pela irregularidade na distribuição espaço-temporal das chuvas que se encontram entre 300 e 800 mm ano⁻¹ (ALVARES et al., 2013; SUDENE, 2021).

Historicamente, a Região Nordeste é grande produtora de cana-de-açúcar, principalmente, sob regime de sequeiro, sendo a maior parte dos cultivos localizados nos tabuleiros costeiros do Litoral e Agreste, apresentando produtividade média na safra 2023/2024 de 62,7 Mg ha⁻¹, abaixo da nacional (78,05 Mg ha⁻¹), de acordo com levantamento da CONAB (2024).

Os resultados do último Censo Varietal IAC (2016/2017) mostraram que as variedades RB ocupam 54% dos canaviais do País, na região norte-nordeste representar áreas superiores a 74% (BRAGA JUNIOR et al., 2023). Segundo a RIDESA (2015), esses resultados devem-se, principalmente, às suas produtividades agroindustriais, em média de 30% a 40% acima das outras variedades cultivadas, com média acima de 80 Mg ha⁻¹ em sequeiro e de 140 Mg ha⁻¹ sob irrigação plena.

Segundo a ANA (2017), a cana-de-açúcar é a cultura agrícola com maior área irrigada no Brasil, com 2,1 milhões de hectares, o que corresponde a 30,2% da área total irrigada. Na região Nordeste 51,7% (456,43 mil ha) dos canaviais possuem algum tipo de irrigação, sendo o Estado de Alagoas o que apresenta o maior percentual de área de cana-de-açúcar irrigada (75%), seguida da Paraíba (54%) e Pernambuco (15%).

Em área comercial de 60 ha plantada com a variedade de cana-de-açúcar RB92579, na Empresa Agroindústrias do Vale do São Francisco (Agrovale), na Bahia, sob irrigação plena, adotando-se sistema localizado e uso da fertirrigação, foi observada uma produtividade de 260 Mg ha⁻¹ em 13 meses, considerado um recorde mundial de máxima produtividade (RIDESA, 2015). Em Recife, Pernambuco, estudos realizados com a mesma variedade por Morais et al.

(2022), avaliando as lâminas de irrigação de 100 e 120% da evapotranspiração da cultura (ETc), observaram produtividades médias de 197 e 216 Mg ha⁻¹.

2.4 Efeitos do estresse hídrico na cana-de-açúcar

Estresses abióticos, tais como seca, salinidade, temperaturas altas e baixas, metais pesados, alagamento e desequilíbrio de nutrientes, reduzem cerca de 51-82% das produtividades das culturas em escala global (COOKE; LEISHMAN, 2016; RAZA et al., 2022; ROORKIWAL et al., 2020; ZAHRA et al., 2021). O déficit hídrico é um dos estresses ambientais mais prejudiciais que representam uma ameaça significativa para a produção agrícola global (WANG et al., 2022).

Cerca de 30% da produção mundial de cana-de-açúcar é afetada por escassez hídrica (DINH et al., 2017). O déficit hídrico dificulta o crescimento, o desenvolvimento e a taxa de assimilação fotossintética de CO₂ (ZHAO; LI, 2015; VERMA et al., 2019a). O perfilhamento da cana-de-açúcar e a fase de crescimento são as fases críticas da sensibilidade hídrica devido à maior necessidade de água para o desenvolvimento saudável da planta (DINH et al., 2017), o período mais crítico ocorre entre 60 e 150 dias após o plantio (RAMESH, 2000; MACHADO et al., 2009).

As reações mais frequentes à falta de água em cana-de-açúcar incluem o fechamento dos estômatos, o enrolamento das folhas, a inibição do crescimento tanto do colmo quanto das folhas, o processo de senescência foliar e a diminuição da área foliar (INMAN-BAMBER; LAKSHMANAN; PARK, 2012; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Além disso, observa-se uma redução no potencial hídrico das folhas (OLIVEIRA FILHO et al., 2021) e acúmulo de prolina (JASMINE; AHAMED; BISWAS, 2022).

Estudos buscam compreender as alterações fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e de crescimento da cana-de-açúcar quando submetida ao estresse hídrico, a fim de identificar quais variedades são mais tolerantes a essas condições e encontrar alternativas para atenuar esses efeitos, como o uso de Si na adubação (CAMARGO et al., 2019; OLIVEIRA FILHO et al., 2021; SOUZA JÚNIOR et al., 2022).

2.5 Utilização do silício na agricultura

O Si ocupa a segunda posição em termos de abundância, tanto na superfície da crosta terrestre quanto nos solos com média de 28,8% de Si total, além disso, cerca de 80% das rochas ígneas, rochas metamórficas e sedimentares são constituídas por minerais silicatados (CAMARGO; KEEPING, 2021; KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022; RAZA et al., 2023).

Na superfície da Terra, os solos possuem cerca de 1% a 5% de Si disponível para as plantas nas formas amorfas de dióxido de Si (SiO_2) e ácido monossilícico (H_4SiO_4), em baixas concentrações variando de 0,1 a 0,6 mM ($2,81 \text{ mg dm}^{-3}$ e $16,85 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente) (EPSTEIN, 1999; KATZ et al., 2021; KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022; SOMMER et al., 2006).

De acordo com a FAO (2022) das 10 culturas mais produzidas no mundo, sete (arroz, cana-de-açúcar, trigo, mandioca, beterraba sacarina, cevada e tomate) encontram-se na categoria de acumuladoras, segundo a classificação de Ma e Takahashi (2002) com conteúdo de Si variando de 1 a 3% com base no seu peso seco e na relação $\text{Si/Ca} > 1$. Globalmente, cerca de 220 milhões de toneladas de Si são removidas anualmente das terras cultivadas pelos processos de lixiviação, migração horizontal, absorção e remoção pelas plantas através da colheita (TUBANA et al., 2016). A maior quantidade de Si é removida pela cana-de-açúcar, variando na faixa de 80-700 kg ha^{-1} (CAMARGO; KEEPING, 2021; CAMARGO; ROCHA; BALTIERI, 2021; MAJUMDAR; PRAKASH, 2020; RAZA et al., 2023).

Embora o Si não seja um elemento essencial para o crescimento das plantas superiores, a Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO, 2014) e o International Plant Nutrition Institute (IPNI, 2015) consideraram o Si como um elemento benéfico para as plantas, devido aos seus benefícios para o crescimento e desenvolvimento saudável de muitas espécies (COSTA et al., 2022; KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022; LIANG et al., 2007; PAVLOVIC et al., 2021; RAZA et al., 2023). O Si foi reconhecido como um importante fertilizante na produção agrícola, devido ao seu papel significativo na capacidade de mitigar estresses abióticos, como salinidade, déficit hídrico, toxicidade de metais pesados e deficiência de nutrientes e estresses bióticos, como pragas e doenças (BEZERRA et al., 2019; JINGER et al., 2020; JOHNSON et al., 2022; MIR et al., 2022; MOSTOFA et al., 2021; VERMA et al., 2019b; VERMA et al., 2020). Esses benefícios podem resultar em uma redução efetiva na necessidade de aplicação de pesticidas e fungicidas (KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022) e proporcionar manejo mais adequado.

No Brasil, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)/Secretaria de Defesa Agropecuária autoriza a aplicação de Si em cultivos agrícolas, conforme estabelecido na Instrução Normativa Nº 61, de 8 de julho de 2020, que classifica o Si como um micronutriente devido aos seus benefícios já comprovados. As fontes de Si mais comuns no Brasil são de escória siderúrgica, que contém silicato de cálcio e magnésio, e os termofosfatos magnesianos (SOUSA; KORNDÖRFER; WANGEN, 2010).

2.6 Sílica amorfa como fonte de Si

Rochas sedimentares compostas por fósseis de algas unicelulares, diatomáceas, revestidas e ricas em sílica amorfa (PRAKASH; ANITHA; SANDHYA, 2019), são matéria prima para a produção de fertilizantes derivados de sílica amorfa. As fontes naturais de sílica amorfa favorecem a retenção água e nutrientes, promovendo melhorias na fertilidade do solo, reduz aporte de contaminantes no solo em comparação às escórias silicatada e aumenta a biomassa de plantas como milho e cana-de-açúcar (NASCIMENTO et al., 2021; PRAKASH; ANITHA; SANDHYA, 2019). Em destaque, a Agrisilica® Granules que é um fertilizante proveniente de terra diatomácea natural da espécie *Melosira granulata* (Ehrenberg) Ralfs, com maior solubilidade do que outras fontes de silício (NASCIMENTO et al., 2021).

Diversos estudos têm demonstrado o potencial dos fertilizantes à base de sílica amorfa no fornecimento de Si para as plantas e, conseqüentemente, aumento nas produtividades de diversas culturas (DAS et al., 2017; PATI et al., 2016; SANDHYA; PRAKASH; MEUNIER, 2018), redução no acúmulo de Cd nos tecidos vegetais do feijão-caupi (SILVA et al., 2023), aumento na eficiência nutricional e redução no estresse por temperatura em duas cultivares de uva (NASCIMENTO et al., 2023) e aumento no teor de fibras na cana-de-açúcar e resistência à broca do colmo (*Diatraea saccharalis*) (OLIVA et al., 2021).

Todavia, pesquisas sobre a eficiência de fertilizantes derivados de sílica amorfa para fertilização de diferentes culturas, manejo de solos contaminados e/ou mitigação de estresses abióticos e bióticos ainda são escassos (NASCIMENTO et al., 2021; OLIVA et al., 2021; SILVA et al., 2023).

2.7 Uso do silício para mitigação do estresse hídrico

O déficit hídrico é um dos estresses abióticos que mais limitam a produção agrícola em todo o mundo. A cana-de-açúcar apresenta diferentes respostas ao estresse hídrico, sendo morfológicas (interrupção do alongamento e divisão celular, inibição do crescimento do colmo e das folhas e redução da área foliar), fisiológicas (fechamento estomático, redução do potencial hídrico, do conteúdo relativo de água e da atividade fotossintética, vazamento de eletrólitos) e bioquímicas (desbalanço nutricional, produção excessiva de espécies reativas de oxigênio – ERO's, diminuição do metabolismo lipídico, ativação de enzimas antioxidantes, acúmulo de proteínas de estresse e de solutos osmóticos) (INMAN-BAMBER; LAKSHMANAN; PARK, 2012; FERREIRA et al., 2017; MAJUMDAR; PRAKASH, 2020; PAVLOVIC et al., 2021; RAZA et al., 2023) que prejudicam o crescimento e afetam gravemente o seu rendimento.

As pesquisas indicam que plantas acumuladoras de Si, como a cana-de-açúcar (KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022; TEIXEIRA; MELLO PRADO; ROCHA, 2021; TEIXEIRA et al., 2022), acumulam Si nas células epidérmicas de tecidos mais velhos, formando fitólitos (KIM et al., 2002). Essa espécie apresenta transportadores eficazes para a absorção de Si (Lsi1, Lsi2 e LS6) (YAMAJI; MA, 2009), o que a coloca como uma cultura responsiva (MAJUMDAR; PRAKASH, 2020). No entanto, é importante notar que os níveis de concentração de Si na cana-de-açúcar podem variar de acordo com diversos fatores, incluindo a variedade cultivada, disponibilidade de água no solo, taxas de transpiração e pH do solo (CAMARGO; KORNDÖRFER; WYLER, 2014; CAMARGO; KEEPING, 2021; HAYNES, 2017).

A cana-de-açúcar tem seu desenvolvimento mais afetado pelo déficit hídrico na fase crítica de crescimento (60 – 150 dias após a emergência) (SOM-ARD et al., 2021), segundo Bezerra et al. (2019) nesse período a escassez de água causa impactos negativos no potencial hídrico, conteúdo relativo de água e vazamento de eletrólitos. O uso do Si em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico reduz o estresse oxidativo ao diminuir o extravasamento de eletrólitos nas células, ao aumentar a concentração de prolina e/ou atividade de enzimas (superóxido dismutase e peroxidase) (BEZERRA et al., 2019). Por consequência, a planta aumenta o teor relativo de água, reduz o potencial hídrico, favorece o ajuste osmótico, e aporta uma maior quantidade de biomassa total (BEZERRA et al., 2019; CAMARGO et al., 2019; TEIXEIRA; MELLO PRADO; ROCHA, 2021).

Portanto, pesquisas atuais utilizando diferentes fontes de Si apresentam resultados positivos em cana-de-açúcar sob déficit hídrico a partir de fontes de Si solúvel em água (TEIXEIRA et al., 2020; SOUZA JÚNIOR et al., 2022).

2.8 Recuperação do silício em colheitas sucessivas de cana-de-açúcar

Apesar da sua abundância nos solos como relatado anteriormente, geralmente o Si é pouco solúvel e tem sua disponibilidade limitada para absorção pelas plantas. Estudos (CAMARGO; ROCHA; BALTIERI, 2021; CAMARGO; KEEPING, 2021) têm demonstrado que cultivos de plantas acumuladoras de Si, ao longo de ciclos sucessivos diminuem os níveis no solo e a fertilização torna-se um manejo indispensável para manutenção de altos rendimentos. Além disso, a maior parte do Si disponível no solo para as plantas nas formas de SiO_2 e H_4SiO_4 , é perdida por lixiviação devido ao intenso intemperismo que predomina em regiões úmidas e subúmidas, especialmente em zonas costeiras (CAMARGO; KEEPING, 2021; MAJUMDAR; PRAKASH, 2020; RAZA et al., 2023).

Devido a sua alta produção de biomassa, a cana-de-açúcar apresenta alta absorção de nutrientes pelas raízes acumulando-os em sua parte aérea (OLIVEIRA et al., 2010) e, conseqüentemente, a cada colheita há uma exportação significativa pelos seus colmos, principal matéria prima utilizada na indústria sucroalcooleira. Camargo, Rocha e Baltieri (2021) avaliando o índice de recuperação de Si por duas cultivares de cana-de-açúcar (IAC87-3396 e SP89-1115) em ciclos consecutivos, observaram que na cana-planta e soca houve recuperação média de 43% da maior dose de aplicada (165 kg ha^{-1}). Desse modo, se a concentração de Si for mantida apenas pelas reservas do solo, as áreas cultivadas continuamente com cana-de-açúcar tendem a ficar esgotadas.

Assim, a quantificação da extração e exportação do Si durante cada ciclo é uma ferramenta importante para melhorar a compreensão das respostas da cultura de cana-de-açúcar à fertilização, bem como utilizar esse recurso de maneira mais eficiente, econômica e sustentável.

Referências Bibliográficas

AAPFCO. Association of American Plant Food Control Officials. **In official publication: AAPFCO**, Publ. n. 67. In: J.V. Slater (ed.) West Lafayette. 2014. 95p.

ABDELHAKIM, L. O. A.; ZHOU, R.; OTTOSEN, C. Physiological responses of plants to combined drought and heat under elevated CO₂. **Agronomy**, v.12, p.2526, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102526>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVEZ, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen'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>

ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017. 86p.

BEZERRA, B. K. L.; LIMA, G. P. P.; REIS, A. R.; SILVA, M. A.; CAMARGO, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

BRAGA JUNIOR, R. L. C.; LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; KANTHACK, R. A. D.; SILVA, D. N.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N.; SILVA, V. H. P.; RODRIGUES, P. E.; CARREGARI, H. R.; ANJOS, I. A. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - safra 2022/23**. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 235). 2023. 71p.

CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81-91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, v. 13, p. 3691-3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, v. 167, p. 64–75, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>

CAMARGO, M. S.; ROCHA, G.; BALTIERI, G. J. Silicate fertilization in sugarcane: silicon availability, uptake, and recovery index over two consecutive cycles. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 2403–2411, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00531-y>

CARNEIRO, K. S. **Caracterização genética de uma população base do programa de melhoramento de cana-de-açúcar da Ridesa**. 79f. 2017. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

CARPANEZ, T. G.; MOREIRA, V. R.; ASSIS, I. R. Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. **Science of The Total Environment**, v. 832, p. 154998, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154998>

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.11 - safra 2023/2024 - Quarto levantamento. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 10 maio 2024.

COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, v. 30, p. 1340–1357, 2016. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>

COSTA, M. G.; SARAH, M. M. S.; MELLO PRADO, R.; PALARETTI, L. F.; PICCOLO, M. C.; SOUZA JÚNIOR, J. P. Impact of Si on C, N, and P stoichiometric homeostasis favors nutrition and stem dry mass accumulation in sugarcane cultivated in tropical soils with different water regimes. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p 1–19, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.949909>

DAS, K. K.; SWAMY, G. S. K.; BISWAS, D.; CHNANIYA, K. K. Response of Soil Application of Diatomaceous Earth as a Source of Silicon on Leaf Nutrient Status of Guava. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, p. 1394-1399, 2017. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.170>

DINH, T. H. K.; WATANABE, K.; TAKARAGAWA, H.; NAKABARU, M.; KAWAMITSU, Y. Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. **Plant Production Science**, v. 20, p. 412–422, 2017. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193p. **Irrigation and Drainage Paper 33**.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, n 1, p. 641-664, 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>

FAO. Food and Agricultural Organization, United Nations. **Production: Crops and livestock products 2000-2021**. Report, : Economic and Social Department, FAO, Rome. 2022. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/cc3751en/cc3751en.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2023.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Food and Agriculture - Statistical pocketbook 2019**. Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca6463en/ca6463en.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

FERREIRA, T. H. S.; TSUNADA, M. S.; BASSI, D.; ARAÚJO, P.; MATTIELLO, L.; GUIDELLI, G. V.; RIGHETTO, G. L.; GONÇALVES, V. R.; LAKSHMANAN, P.; MENOSSI, M. Sugarcane water stress tolerance mechanisms and its implications on developing biotechnology solutions. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1-18, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01077>

HAYNES, R. J. Significance and role of Si in crop production. **Advances in Agronomy**, v. 146, p. 83-166, 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.06.001>

INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, v. 134, p. 95-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.004>

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, p. 185-202, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

IPNI. International Plant Nutrition Institute. **Nutri-facts**. Silicon. n.14. 2015.

JASMINE, H. S.; AHAMED, K. U.; BISWAS, J. K. Water stress effect on biochemical processes of aus rice genotypes. **American Journal of Plant Sciences**, v. 13, p. 912-927, 2022. <https://doi.org/10.4236/ajps.2022.136060>

JINGER, D.; DEVI, M. T.; DHAR, S.; DASS, A.; SHARMA, V. K.; KUMAR, V.; JOSHI, E.; JATAV, H. S.; SINGH, N. Silicon application mitigates abiotic stresses in rice: A review. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 90, p. 2043-2050, 2020.
<https://doi.org/10.56093/ijas.v90i11.108557>

JOHNSON, S. N.; CHEN, Z.; ROWE, R. C.; TISSUE, D. T. Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 4444, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>

KATZ, O.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; PRAKASH, N. B.; SCHALLER, J. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants**, v. 10, p. 652, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>

KIM, S. G.; KIM, K. W.; PARK, E. W.; CHOI, D. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. **Phytopathology**, v. 92, p. 1095-1103, 2002.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2002.92.10.1095>

KOVÁCS, S.; KUTASY, E.; CSAJBÓK, J. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. **Plants**, v. 11, p. 1-22, 2022.
<https://doi.org/10.3390/plants11091223>

LIANG, Y.; SUN, W.; ZHU, Y.-G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environ Pollution**, v. 147, p. 422–428, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. 1.ed. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2002. 294p

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1575-1582, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>

MAJUMDAR, S.; PRAKASH, N. B. An overview on the potential of silicon in promoting defence against biotic and abiotic stresses in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1969–1998, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00269-z>

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa N° 61, de 08 de julho de 2020**. Disponível: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>>. Acesso em: 28/08/2023.

MARQUARDT, A.; HENRY, R. J.; BOTHA, F. C. Effect of sugar feedback regulation on major genes and proteins of photosynthesis in sugarcane leaves. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 321-333, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.022>

MIR, R. A.; BHAT, B. A.; YOUSUF, H.; ISLAM, S. T.; RAZA, A.; RIZVI, M. A.; CHARAGH, S.; ALBAQAMI, M.; SOFI, P. A.; ZARGAR, S. M. Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1–26, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>

MORAIS, J. E. F.; SILVA, E. F. F.; NETO, A. H. G.; LIMA, B. L. C.; LIRA, R. M.; BERTO, S. D. C.; JARDIM, A. M. R. F.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, T. G. F.; ROLIM, M. M. Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under saline stress: growth, productivity, technological quality, and industrial yield. **Industrial Crops & Products**, v. 188, p. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115642>

MOSTOFA, M. G.; RAHMAN, M.; ANSARY, M. U.; KEYA, S. S.; ABDELRAHMAN, M.; MIAH, G.; TRAN, L. P. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 41, p. 918–934, 2021. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582>

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; ARAÚJO, J. C. T.; LINS, S. A. S. Efficiency and recovery index of silicon of a diatomaceous Earth-based fertilizer in two soil types grown with sugarcane and maize. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 16, p. 2347–2358, 2021. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918157>

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; LIMA, L. H. V.; SILVA, J. R.; VELOSO, V. L.; SILVA, F. L.; FREITAS, S. T.; SANTOS, L. F.; SANTOS, M. A. Silicon Application to Soil Increases the Yield and Quality of Table Grapes (*Vitis vinifera* L.) Grown in a Semiarid Climate of Brazil. **Silicon**, v. 15, p. 1647-1658, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02129-0>

OLIVA, K. M. E.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous Silica-Based Fertilizer Increases Stalks and Sugar Yield and Resistance to Stalk Borer in Sugarcane Grown Under Field Conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 2518-2529, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>

OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; MELLO PRADO, R.; TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; SOUZA JUNIOR, J. P.; PICCOLO, M. C.; ROCHA, J. R. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N:P stoichiometry and its use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 255, p. 107006, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1343-1352, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>

PALACIOS-BERECHÉ, M. C.; PALACIOS-BERECHÉ, R.; ENSINAS, A. V.; GALLEGÓ, A. G.; MODESTO, M.; NEBRA, S. A. Brazilian sugar cane industry – A survey on future improvements in the process energy management. **Energy**, v.259, p.124903, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124903>

PATI, S.; PAL, B.; BADOLE, S.; HAZRA, G. C.; MANDAL, B. Effect of Silicon Fertilization on Growth, Yield, and Nutrient Uptake of Rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, p. 284–290, 2016. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1122797>

PAVLOVIC, J.; KOSTIC, L.; BOSNIC, P.; KIRKBY, E. A.; NIKOLIC, M. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1224, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>

PRAKASH, N. B.; ANITHA, M. S.; SANDHYA, K. Behaviour of Different Levels and Grades of Diatomite as Silicon Source in Acidic and Alkaline Soils. **Silicon**, v. 11, p. 2393–2401, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9373-9>

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 185, p. 83-89, 2000. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00404.x>

RAZA, A.; TABASSUM, J.; ZAHID, Z.; CHARAGH, S.; BASHIR, S.; BARMUKH, R.; KHAN, R. S. A.; BARBOSA, F.; ZHANG, C.; CHEN, H.; ZHUANG, W.; VARSHNEY, R. K. Advances in “omics” approaches for improving toxic metals/metalloids tolerance in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 794373, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.794373>

RAZA, T.; MAZAHIR, A.; AMNA; IMRAN, S.; KHAN, M. Y.; REBI, A.; RAFIE-RAD, Z.; EASH, N. S. Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. **Silicon**, v. 15, p. 3797–3817, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02302-z>

RIDESA. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucoalcooleiro. **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa**. 1.ed. Curitiba: Graciosa, 2015. 156p.

ROORKIWAL, M.; BHARADWAJ, C.; BARMUKH, R.; DIXIT, G. P.; THUDI, M.; GAUR, P. M.; CHATURVEDI, S. K.; FIKRE, A.; HAMWIEH, A.; KUMAR, S.; SACHDEVA, S.; OJIEWO, C. O.; TAR'AN, B.; WORDOFA, N. G.; SINGHN. P.; SIDDQUE, K. H. M.; VARSHNEY, R. K. Integrating genomics for chickpea improvement: achievements and opportunities. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 133, p. 1703–1720, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03584-2>

SANDHYA, K.; PRAKASH, N. B.; MEUNIER, J. D. Diatomaceous earth as source of silicon on the growth and yield of rice in contrasted soils of Southern India. **Journal of Soil and Plant Nutrition**, v. 18, p. 344–360, 2018. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162018005001201>

SANTOS, F.; EICHLER, P.; MACHADO, G.; MATTIA, J.; SOUZA, G. Chapter 2: By-products of the sugarcane industry. **Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives**, v. 1, p. 21-48, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00002-0>

SILVA, F. L.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; SILVA, R. L.; PARAIZO, T. S.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous Silica-Based Fertilizer Reduces Cd Uptake and Translocation and Human Health Risk in Polluted Soil Grown with Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, p. 3174-3185, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01333-0>

SOM-ARD, J.; ATZBERGER, C.; IZQUIERDO-VERDIGUIER, E.; VUOLO, F.; IMMITZER, M. Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review. **Remote sensing**, v. 13, p. 4040, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13204040>

SOMMER, M. KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes - a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 310-329, 2006. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>

SOUSA, R. T. X. D.; KORNDÖRFER, G. H.; WANGEN, D. R. B. Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, p. 669-676, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000300019>

SOUZA JÚNIOR, J. P.; OLIVEIRA, T. L.; MELLO PRADO, R.; OLIVEIRA, K. R.; SOARES, M. B. Analyzing the role of silicon in leaf C:N:P stoichiometry and its effects on nutritional efficiency and dry weight production in two sugarcane cultivars. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 2687-2694, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00836-6>

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do Semiárido – 2021: Relatório final**. Pernambuco: Recife, 2021. 272p.

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. C. Silicon as a sustainable option to increase biomass with less water by inducing carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometric homeostasis in sugarcane and energy cane. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1-18, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. C. Root-and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **Plos One**, v. 15, n. 10, p. 1-24, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>

TUBANA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in us agriculture: History and future perspectives. **Soil Science**, v. 181, n. 9/10, p. 393-411, 2016. <https://doi.org/10.1097/SS.000000000000179>

VERMA, K. K.; LIU, X.; WU, K.; SINGH, R. K.; SONG, Q.; MALVIYA, M. K.; SONG, X.; SINGH, P.; VERMA, C. L.; LI, Y. The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon**, v. 12, p. 1355–1367, 2019a. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00228-z>

VERMA, K. K.; SINGH, R. K.; SONG, Q.; SINGH, P.; ZHANG, B.; SONG, X.; CHEN, G.; LI, Y. R. Silicon alleviates drought stress of sugarcane plants by improving antioxidant responses. **Biomedical Journal of Scientific & Technical**, v. 17, n. 1, p. ID. 00295712580-12586, 2019b. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.17.002957>

VERMA, K. K.; SONG, X.; LI, D.; SINGH, M.; RAJPUT, V. D.; MALVIYA, M. K.; MINKINA, T.; SINGH, R. K.; SINGH, P.; LI, Y. Interactive role of silicon and plant–rhizobacteria mitigating abiotic stresses: A new approach for sustainable agriculture and climate change. **Plants**, v. 9, p. 1223, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9091055>

WANG, Z.; YANG, Y.; YADAV, V.; ZHAO, W.; HE, Y.; ZHANG, X.; WEI, C. Drought-induced proline is mainly synthesized in leaves and transported to roots in watermelon under water deficit. **Horticultural Plant Journal**, v. 8, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2022.06.009>

YAMAJI, N.; MA, J. F. A transporter at the node responsible for intervascular transfer of silicon in rice. **The Plant Cell**, v. 21, p. 2878-2883, 2009. <https://doi.org/10.1105/tpc.109.069831>

ZAHRA, N.; HAFEEZ, M. B.; SHAUKAT, K.; WAHID, A.; HUSSAIN, S.; NASEER, R.; RAZA, A.; IQBAL, S.; FAROOQ, M. Hypoxia and anoxia stress: Plant responses and tolerance mechanisms. **Journal Agronomy Crop Science**, v. 207, p. 249–284, 2021. <https://doi.org/10.1111/jac.12471>

ZHAO, D.; LI, Y. Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy**, v. 2015, p. 547386, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/547386>.

3. CAPÍTULO II: SILÍCIO MITIGA O EFEITO DE DÉFICIT HÍDRICO EM CANA-SOCA EM FUNÇÃO DA MELHORIA NO POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR, AJUSTAMENTO OSMÓTICO E BIOMASSA

Resumo

A seca é uma das principais causas de redução da produtividade agrícola em função dos impactos no crescimento e fisiologia vegetal. O uso do silício (Si) tem se destacado como um recurso eficaz na mitigação dos danos do estresse hídrico em plantas. A pesquisa teve como objetivo avaliar as variáveis de crescimento, potencial hídrico foliar e ajustamento osmótico em cana-soca sob efeito residual de um fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA) aplicada via solo no primeiro ciclo. Plantas de cana-soca foram cultivadas em dois níveis de umidade do solo (40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água – CMRA) e quatro doses de FSA, correspondentes a 0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹ de Si, durante um período de 150 dias após o corte (DAC). Foram avaliadas variáveis de crescimento, produção de massa fresca, potencial hídrico, potencial osmótico, extravasamento de eletrólitos, teor relativo de água e suculência foliar das plantas. O regime hídrico de 80% da CMRA combinado com 156 kg ha⁻¹ de Si promoveu aumentos na altura de colmo (+28%), diâmetro de colmo (+6%) e área foliar (+126%), em comparação à 40% da CMRA. A dose 156 kg ha⁻¹ de Si resultou aumentos de aproximadamente 15% no potencial hídrico, 11% no potencial osmótico, 15% no teor relativo de água e 14% na suculência foliar, além da redução média de 54% no extravasamento de eletrólitos. O Si atenuou os efeitos do estresse hídrico por possibilitar redução no extravasamento de eletrólitos e aumento no potencial hídrico foliar e teor relativo de água da cana-soca.

Palavras-chave: Crescimento vegetal. Estresse abiótico. Relações hídricas. *Saccharum officinarum* L.. Sílica amorfa.

CAPÍTULO II: SILICON MITIGATES THE EFFECTS OF WATER DEFICIT IN RATOON SUGARCANE AND ENHANCES LEAF WATER POTENTIAL, OSMOTIC ADJUSTMENT, AND BIOMASS PRODUCTION

Abstract

Drought is a significant contributor to diminished agricultural output, largely due to its detrimental effects on plant growth and physiology. The utilization of silicon (Si) has been identified as an efficacious strategy for the mitigation of the adverse effects associated with water stress in plants. The objective of this study was to evaluate the impact of a fertilizer derived from amorphous silica (ASF) applied to the soil during the first cycle on growth variables, leaf water potential, and osmotic adjustment in ratoon sugarcane. Ratoon sugarcane plants were cultivated under two soil moisture levels (40% and 80% of the maximum water retention capacity (MWRC) and four ASF rates, corresponding to 0.0, 78.0, 117.0, and 156.0 kg ha⁻¹ of Si, over a period of 150 days after cutting. The growth variables, fresh mass production, water and osmotic potential, electrolyte leakage, relative water content, and leaf succulence were evaluated. The combination of an 80% MWRC of water regime with 156 kg ha⁻¹ of Si resulted in increases in stalk height (+28%), stalk diameter (+6%), and leaf area (+126%) compared to the 40% MWRC. The application of 156 kg ha⁻¹ of Si resulted in a 15% increase in water potential, 11% increase in osmotic potential, 15% increase in relative water content, and 14% increase in leaf succulence. Additionally, there was an average reduction of 54% in electrolyte leakage. The use of Si mitigated the effects of water stress by reducing electrolyte leakage and enhancing leaf water potential and relative water content in ratoon sugarcane.

Keywords: Plant growth. Abiotic stress. Water relations. *Saccharum officinarum* L.. Amorphous silica.

3.1 Introdução

A cana-de-açúcar é cultivada em mais de 100 países, ocupando uma área estimada de quase 26 milhões de hectares, com cerca de 80% da produção concentrada em dez países: Brasil, Índia, China, México, Tailândia, Paquistão, Colômbia, Austrália, Indonésia e Estados Unidos (FAO 2019; SANTOS et al., 2020). Na safra 2023/2024, o Brasil colheu 8,33 milhões de hectares, com produção de 713 milhões de toneladas, aproximadamente metade da produção mundial (CONAB 2024).

Cerca de 30% da produção mundial de cana-de-açúcar é afetada por escassez hídrica (DINH et al., 2017), o que dificulta o crescimento e o desenvolvimento da cultura (VERMA et al., 2019a; ZHAO; LI, 2015). No Brasil, a CONAB já estima uma redução de 3,8% na safra de 2024/25 (CONAB 2024), em consequência dos baixos índices pluviométricos e das altas temperaturas na região Centro-Sul, no entanto, há projeções de redução de até 20% nos próximos 10 anos devido aos efeitos das mudanças climáticas.

O perfilhamento e a fase de crescimento da cana (60 – 150 dias após a emergência) são períodos de alta sensibilidade ao déficit hídrico (MACHADO et al., 2009; SOM-ARD et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022a). Fechamento dos estômatos, enrolamento das folhas, inibição do crescimento do colmo e das folhas, início precoce da senescência foliar e a redução da área foliar são comuns na cana em déficit hídrico (INMAN-BAMBER; LAKSHMANAN; PARK, 2012; INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Além disso, há impactos negativos no potencial hídrico, teor relativo de água e extravasamento de eletrólitos (BEZERRA et al., 2019; OLIVEIRA FILHO et al., 2021a).

O Si é um elemento benéfico (AAPFCO 2014; IPNI 2015) devido ao seu papel de mitigar estresses abióticos, como salinidade, déficit hídrico, toxicidade de metais pesados, e estresses bióticos, como pragas e doenças (BEZERRA et al., 2019; JINGER et al., 2020; JOHNSON et al., 2022; MIR et al., 2022; MOSTOFA et al., 2021; VERMA et al., 2019b, 2020). Apenas 1% a 5% do Si nos solos está disponível para as plantas na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), em baixas concentrações (EPSTEIN, 1999; KATZ et al., 2021; KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022; SOMMER et al., 2006). Fontes naturais amorfas de Si têm sido recomendadas para aplicação no solo devido a sua maior solubilidade (GOKAVI et al., 2021), aumento na retenção de água e nutrientes, aumento da biomassa de plantas como milho e cana-de-açúcar, melhora no estado nutricional das plantas e mitigação nos efeitos negativos de estresses abióticos (PRAKASH et al., 2019; NASCIMENTO et al., 2021, 2023).

O uso do Si em plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico previne o desequilíbrio hídrico por meio do acúmulo do Si nas paredes celulares reduzindo a perda de água por transpiração

(TEIXEIRA et al., 2022a). Como resultado, a planta aumenta o teor relativo de água, reduz o potencial hídrico, favorece o ajuste osmótico, e aumenta a produção de biomassa total (BEZERRA et al., 2019; CAMARGO et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2021).

Além disso, o Si induz alterações osmorregulatórias ao modificar o conteúdo de prolina e aumento no conteúdo de solutos nas células (TEIXEIRA et al., 2022b) e reduz o extravasamento de eletrólitos nas células (BEZERRA et al., 2019).

A cana-de-açúcar tem alta extração de nutrientes, que são acumulados na parte aérea. Camargo et al. (2021) avaliando o índice de recuperação de Si por duas cultivares de cana-de-açúcar (IAC87-3396 e SP89-1115) em ciclos consecutivos, observaram que na cana-planta e soca houve uma exportação de 154 kg ha⁻¹ de Si, com recuperação média de 43% da maior dose de aplicada (165 kg ha⁻¹).

A compreensão das respostas morfofisiológicas e produtivas da cana-de-açúcar sob estresse hídrico e aplicação de Si em diferentes ciclos é essencial para aprimorar o manejo da fertilização silicatada. Embora os efeitos da seca e o papel benéfico do Si na mitigação de estresses abióticos sejam conhecidos, o efeito residual da adubação silicatada sob estresse hídrico raramente é investigado. Estudos nessa área trazem novas perspectivas sobre a fertilização silicatada, oferecendo estratégias para garantir produtividade e sustentabilidade a longo prazo.

Nesse contexto, nossa hipótese é de que o efeito residual das doses de Si (0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹) em cana-soca sob 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água (CMRA) promove melhorias nas relações hídricas da cultura e, conseqüentemente, favorece a produtividade. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar as variáveis de crescimento (altura e diâmetro do colmo, número de plantas e área foliar), produção de massa fresca, potencial hídrico, potencial osmótico, ajustamento osmótico, extravasamento de eletrólitos, teor relativo de água e suculência foliar no ciclo sucessivo da cana-soca sob estresse hídrico, considerando o efeito residual das doses de um fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA) aplicadas na cana-planta.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Local do experimento e caracterização das unidades experimentais

O experimento foi conduzido em casa de vegetação (Figura 1) no Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco, na cidade de Recife – PE, Brasil. A temperatura e umidade média durante o experimento foram de 35,1 °C e 58,2%, respectivamente, mensurados por um termo-higrômetro digital (Modelo INCOTERM-7666.02.0.00).

Figura 1 – Casa de vegetação utilizada na condução do experimento



Fonte: autoral.

O solo utilizado no experimento foi coletado na camada de 0-20 cm de um Argissolo Amarelo Distrocoeso de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2018), equivalente ao Ultisol Yellow Eutrophic na classificação U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2022). Os Argissolos abrangem cerca de 24% do território brasileiro (PRONASOLOS, 2024) e são amplamente empregados no cultivo de cana-de-açúcar. A unidade experimental foi composta por vaso preenchido com 90 kg de solo com intuito de proporcionar um maior volume de solo para manutenção da planta por um período de 150 dias.

No primeiro ciclo, cana planta, foi cultivada a variedade RB041443 de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), a qual é indicada para sistema irrigado ou sequeiro com

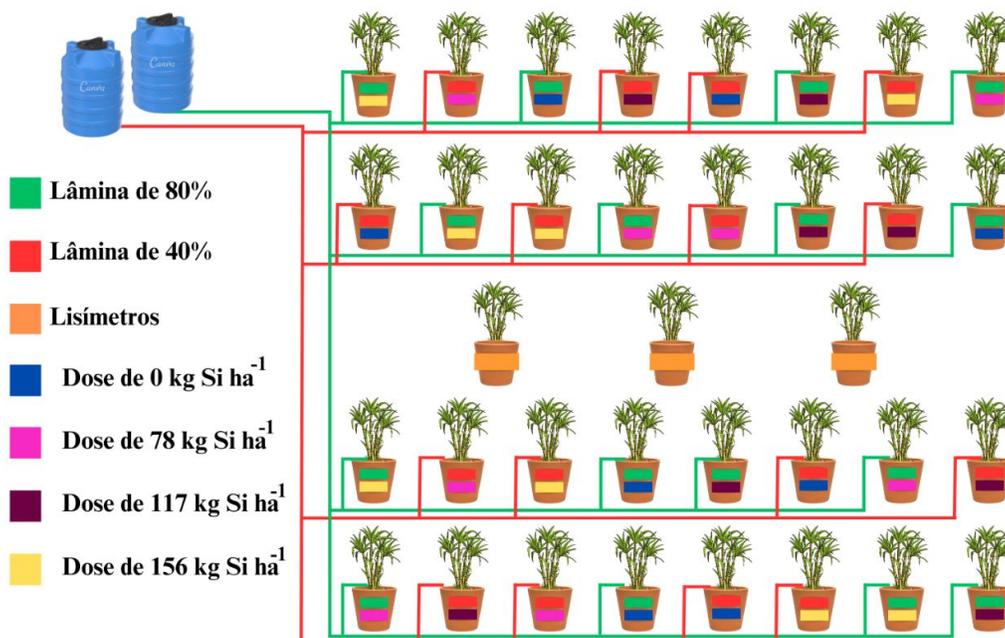
crescimento ereto, baixo florescimento e alta produtividade (OLIVEIRA; HOFFMANN; BARBOSA, 2021). A variedade está em crescente expansão nas áreas plantadas do estado de Pernambuco, apresentando um crescimento de 4,8% (BRAGA JUNIOR et al., 2023).

Foram construídos três lisímetros de drenagem do mesmo modo que as unidades experimentais, porém para coleta da solução drenada foi adicionado ao final do vaso um adaptador flange soldável de 32 mm e, posicionado a 0,50 m de altura do piso para permitir a coleta do excesso (drenado) de água em uma garrafa de polietileno tereftalato de 5 L.

3.2.2 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos casualizados em esquema fatorial 2 x 4. Na cana-soca foram avaliados oito tratamentos, sendo duas condições de disponibilidade de água no solo (40% e 80% da CMRA) e quatro doses de Si (0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹), com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais (Figura 2). As unidades do solo foram controladas por um sistema de irrigação automatizado e utilizando-se como referência a média do balanço hídrico de três lisímetros de drenagem. O turno de rega foi aplicado a cada dois dias, onde as lâminas foram fornecidas de acordo com cada tratamento.

Figura 2 – Layout da área experimental, destacando as distribuições das lâminas de irrigação e doses de Si



Fonte: autoral.

O Si foi fornecido na adubação de fundação da cana-planta, em ciclo anterior, como fertilizante granular (2-5mm), correspondentes a 0,0; 300,0; 450,0 e 600,0 kg ha⁻¹ do FSA (Agrisilica® Granules). Este fertilizante possui Si solúvel (26%), nitrogênio (0,07%), fósforo (0,02%), potássio (0,08%), enxofre (0,09%), cálcio (1,4%), magnésio (1,1%), ferro (1,3%), manganês (219 mg kg⁻¹), boro (4,9 mg kg⁻¹), cobre (22 mg kg⁻¹), zinco (18 mg kg⁻¹) e Molibdênio (2,1 mg kg⁻¹), capacidade de troca catiônica (CTC) de 50,0 cmol_c dm³ e densidade de 900,0 kg m⁻³. Considerando a percentagem de 26% de Si as doses utilizadas na apresentação dos resultados serão de 0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹, as doses do fertilizante silicatado foram baseadas recomendações do fabricante (cana-de-açúcar: aplicar 300 - 600 kg ha⁻¹) e em estudos de Camargo et al. (2014).

3.2.3 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação foi realizado por meio do balanço hídrico dos lisímetros de drenagem a cada 48 horas, de acordo com adaptação da Equação 1 recomendada por Alves et al. (2017).

$$I = 1,1 \times (La - Ld) \quad (1)$$

Em que: *I* – Irrigação aplicada (L); *La* – Lâmina aplicada nos lisímetros (L); *Ld* – Lâmina drenada dos lisímetros (L).

O sistema foi automatizado por meio de temporizadores digitais com duas eletrobombas centrífugas de eixo horizontal de 0,5 CV conectadas recipientes com capacidade 100 L, os quais foram abastecidos com água de abastecimento local.

A fim de suprir as perdas por evapotranspiração e garantir a drenagem nos lisímetros foi somado 10% a irrigação aplicada, assim, fez-se o controle diário do volume drenado de forma a garantir que este encontre-se a 100% da CMRA. As lâminas aplicadas nos tratamentos foram correspondentes a 40 e 80% da CMRA dos lisímetros, obtidas por meio da razão entre o volume evapotranspirado (*Ve*) para 100% da lâmina e a eficiência de aplicação de água (*Ea*), obtendo-se o volume bruto (*Vb*) de irrigação. O tempo de irrigação foi determinado pela Equação 2.

$$Ti = \frac{Vb}{qe} \quad (2)$$

Em que: *Ti* – tempo de irrigação (h); *Vb* – volume bruto (L); *qe* – vazão do gotejador (L h⁻¹).

O início da diferenciação das lâminas de irrigação ocorreu 25 dias após o corte (DAC), aplicando-se as respectivas lâminas dos tratamentos descritas anteriormente. As lâminas de irrigação referentes aos tratamentos de 40 e 80% CMRA somaram ao longo do experimento 102,02 (0,65 L dia⁻¹) e 186,76 L (1,19 L dia⁻¹), respectivamente.

3.2.4 Breve histórico do primeiro cultivo da cana-planta

O primeiro ciclo da cana planta teve duração de 150 dias com os mesmos tratamentos descritos anteriormente. No plantio da cana-planta foram utilizados 3 rebolos com uma gema cada, após a germinação e estabelecimento da planta realizou-se o desbaste, onde permaneceu apenas uma planta com características superiores às demais.

Os resultados de crescimento e variáveis fisiológicas são escopo de outra publicação que teve como objetivo avaliar o efeito inicial da aplicação do Si no primeiro cultivo da cana. Após o corte da planta aos 150 dias, o solo foi analisado e realizado uma nova adubação (Tabela 1) com solução nutritiva de macro e micronutrientes (HOAGLAND; ARNON, 1950). A necessidade da cultura foi remediada de acordo com a Recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco, Brasil (CAVALCANTI et al., 2008).

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do Argissolo Amarelo Distrocoeso utilizado no experimento

Propriedades físicas										
Dp	Ds	P		Areia	Silte	Argila				
-----g cm ⁻³ -----		-----%-----			-----g kg ⁻¹ -----					
2,52	1,45	42,46		705	79	216				
Propriedades químicas										
pH	MO	P	Si ácíd acético	K	Na	Ca	Mg	Al+H	CTC	V
	g dm ⁻³	-----mg dm ⁻³ -----					-----cmol _e dm ⁻³ -----			%
6,10	28,95	130,75	20,90	0,16	0,28	4,00	1,36	3,56	9,40	61

Dp: densidade de partículas; Ds: densidade do solo; P: porosidade total; MO: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação de bases ($V = (SB / t) \times 100$); SB: soma de bases ($SB = Ca + Mg + K + Na$); t: CTC efetiva ($t = SB + Al$).

3.2.5 Avaliações na cana-soca

A cana-soca foi monitorada por um período de 150 dias e realizadas avaliações de crescimento e de variáveis fisiológicas com o intuito de entender o efeito residual da aplicação de Si via fundação ainda na cana planta. Portanto, os regimes hídricos e as doses utilizadas foram os mesmos utilizados no primeiro ciclo.

3.2.6 Altura de colmo, diâmetro do colmo, número de plantas e área foliar

As variáveis biométricas foram medidas aos 30; 45, 60; 75, 90, 105, 120 e 150 DAC (dias após corte). Para determinação da altura do colmo (AC) utilizou-se uma fita métrica, onde considerou-se a superfície do solo até a altura da bainha da folha +1. Para o diâmetro de colmo

(DC) realizou-se medições na altura de 1/3 da altura do colmo a partir da base, com auxílio de paquímetro digital. Foram contabilizados número de plantas e o número de folhas verdes (NFV) e secas (NFS), considerou-se como folhas verdes, aquelas totalmente expandidas com pelo menos 20% de área foliar verde, a partir da folha +1.

A área foliar (AF) foi determinada após medições do comprimento e largura do limbo foliar na parte mediana da folha +3, utilizando uma fita métrica; de posse desses dados foi calculada pela Equação 3 proposta por Hermann e Câmara (1999):

$$AF = C \times L \times 0,75 \times (N + 2) \quad (3)$$

Em que: AF – área foliar (cm²); C – comprimento da folha +3 (cm); L – largura da folha +3 (cm); 0,75 – o fator de correção da cultura (adimensional); N – número de folhas verde, (unidades).

3.2.7 Potencial hídrico e potencial osmótico

O potencial hídrico foliar (Ψ_w , MPa) foi mensurado aos 150 DAC, no terço médio da lâmina da folha +1 utilizando uma Câmara de Pressão de Scholander (Modelo 1515D Pressure Chamber Instrument, PMS Instrument Company Inc., Albany, OR USA). Aplicou-se pressão para visualização do momento de eminência do extravasamento da seiva na região do corte no pecíolo foliar (PAULINO et al., 2020; TURNER, 1981). As medições foram realizadas na antemanhã e ao meio-dia para avaliar o efeito da transpiração nessa variável.

O potencial osmótico (Ψ_s , MPa) foi avaliado aos 150 DAC na mesma folha utilizada para o Ψ_w . Foram coletados discos foliares, colocados em um tubo de centrífuga de 2 ml e mantidas a -20°C, em seguida, os discos foram macerados com auxílio de um almofariz, pistilo e nitrogênio líquido para obtenção da seiva celular.

A seiva obtida do tecido foliar foi filtrada e centrifugada sob refrigeração de 4 °C a 10.000 g por 15 min. Para determinação da osmolalidade (C) utilizou-se 10 µL em Osmômetro de Pressão de Vapor (Modelo Vapro® 5600, Wescor Inc., Logan, UT, USA). Os valores obtidos em mol kg⁻¹ foram convertidos em potenciais osmótico pela equação de Van't Hoff (PAULINO et al., 2020).

$$\Psi_s = - R \times T \times C \quad (4)$$

Em que: R – Constante geral dos gases (0,00831 kg MPa mol⁻¹ K⁻¹); T – Temperatura em Kelvin (K); C – Concentração do soluto (mol kg⁻¹).

3.2.8 Ajustamento osmótico, extravasamento eletrólitos, teor relativo de água e suculência foliar

O ajustamento osmótico (AO) foi determinado aos 150 DAC na folha +1. Fragmentos das folhas foram acondicionados em sacos preenchidos com água destilada por 24h a 4 °C. Ao atingir o completo turgor as folhas foram maceradas com auxílio almofariz e pistilo. A seiva extraída foi filtrada e centrifugada a 10000 g por 15 min. A leitura foi realizada no Osmômetro de Pressão de Vapor (Modelo Vapro® 5600, Wescor Inc., Logan, UT, USA), os valores obtidos em mol kg⁻¹ foram transformados pela equação de Van't Hoff. O ajustamento osmótico (AO_{total}, MPa) foi obtido a partir da diferença entre potencial osmótico das plantas controle e das plantas estressadas (Equação 6) conforme descrito por Blum (1989).

$$AO_{total} = \Psi_{oc} - \Psi_{oe} \quad (6)$$

Em que: Ψ_{oc} – Potencial osmótico das plantas controle a pleno turgor (MPa); Ψ_{oe} – Potencial osmótico das plantas estressadas a pleno turgor (MPa).

Os danos à membrana celular foram determinados aos 150 DAC. Avaliou-se por meio da determinação do extravasamento de eletrólitos do tecido foliar. Para isso, foram coletados 10 discos foliares da folha +1 e emergidos em 30 ml de água deionizada por 2 horas. Em seguida, a condutividade elétrica livre (CL, $\mu\text{S cm}^{-1}$) foi medida utilizando um condutivímetro de bancada (Modelo DM-32, Digimed®). Após a leitura as amostras foram submetidas a um banho maria a 95°C por 1 hora para a leitura seguinte da condutividade elétrica total (CT, $\mu\text{S cm}^{-1}$). Com esses dados, calculou-se o extravasamento de eletrólitos (EE, %) conforme Equação 7 (VASQUEZ-TELLO et al., 1990).

$$EE = \frac{CL}{CT} \times 100 \quad (7)$$

Aos 150 DAC dias coletou-se dez discos (0,6 cm de diâmetro) da folha +1. Os discos foram pesados para obter a massa fresca (MF, g). Em seguida, as amostras foram reidratadas em água deionizada para obter a massa túrgida (MT, g) e secas em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C, a fim de conseguir a massa seca (MS, g). Os valores de teor relativo de água (TRA, %) foram determinados pela Equação 8 proposta por Barrs e Weatherley (1962).

$$TRA = \left[\frac{(MF - MS)}{(MT - MS)} \right] \times 100 \quad (8)$$

Os valores de suculência foliar (SF, g dm⁻²) foram obtidos com base nos dados de teor relativo de água, a partir das relações entre MF, MS e área dos discos foliares (A, dm²), representada pela Equação 9 (DELF et al., 1912).

$$SF = \frac{MF - MS}{A} \times 100 \quad (9)$$

3.2.9 Produção de massa fresca

Após 150 DAC a massa fresca da folha (MFF, g planta⁻¹), massa fresca do colmo (MFC, g planta⁻¹) e massa fresca total (MFT, g planta⁻¹) foram obtidas por pesagem em balança digital.

3.2.10 Análise estatística

Os dados de relações hídricas nas plantas foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade e análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($P \leq 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos para o fator dosagens de Si foram comparados mediante análise de regressão ($P \leq 0,05$). Na possibilidade de utilização do modelo de parcela subdividida no tempo para os dados de crescimento coletados ao longo do período experimental (medidas repetidas no tempo), foi aplicado o teste de esfericidade de Mauchly e, sendo esta condição significativa ($P \leq 0,05$), foi realizado o teste de MANOVA (análise multivariada) e os tratamentos ajustados por meio de modelos de regressão múltipla (superfície de resposta), considerando o tempo (DAC) e doses de Si como variáveis independentes. As análises foram realizadas utilizando o software STATÍSTICA versão 10.0 (STATSOFT. INC, 2010).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Altura do colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), número de plantas (NP) e área foliar (AF)

A análise multivariada evidenciou efeito significativo ($W \leq 0,01$) nas variáveis com medidas repetidas no tempo da altura de colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), número de plantas (NP) e área foliar (AF) da cana-soca para a interação do fator tempo (DAC) × capacidade máxima de retenção de água (CMRA) × doses de Si pelo teste de esfericidade de Mauchly (Tabela 2).

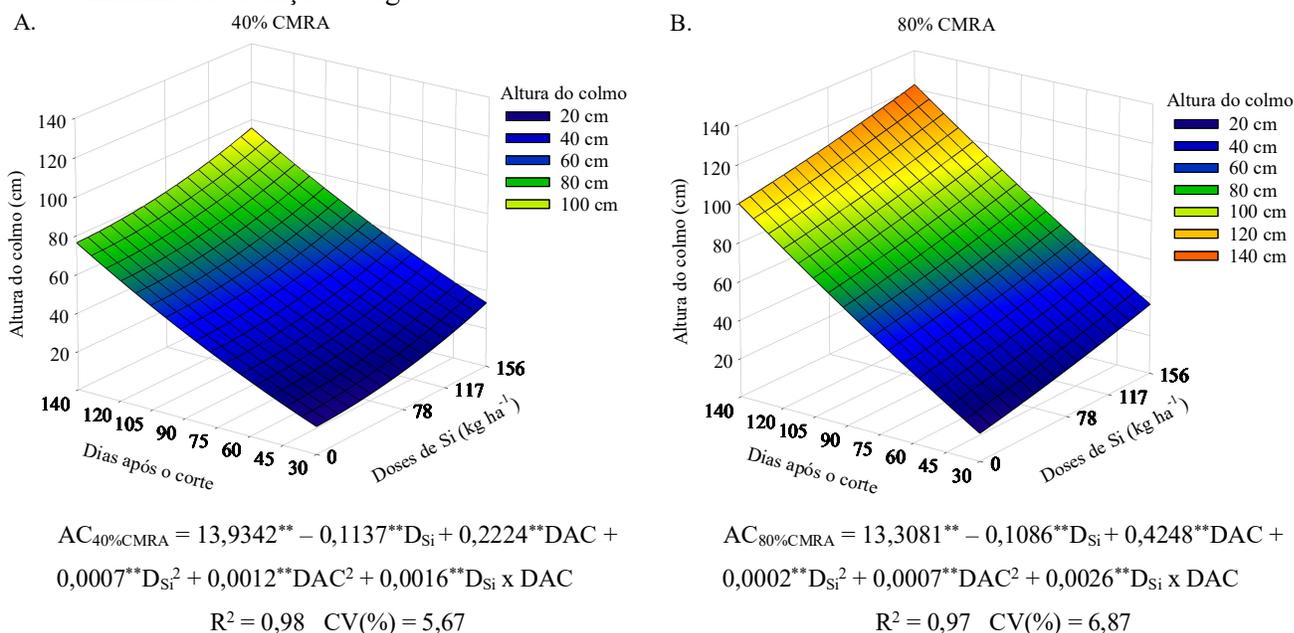
Tabela 2 – Resumo da análise multivariada para às variáveis altura de colmo (AC), diâmetro do colmo (DC), número de plantas (NP) e área foliar (AF) em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

Fonte de variação	GL	Quadrado médio			
		AC	DC	NP	AF
DAC	7	20794,70**	479,97**	90,69**	33431411,00**
DAC × CMRA	7	569,51**	4,93**	5,42**	4519889,11**
DAC × Doses de Si	21	256,32**	2,84**	0,89**	666421,34**
DAC × CMRA × Doses de Si	21	47,94**	1,10**	1,00**	135214,41**
Resíduo	21	2,53	0,24	0,31	17290,13

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ns - não significativo, pelo teste Wilks. GL - Grau de liberdade; DAC- Tempo; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água.

As superfícies de resposta para AC na cana-soca em função das doses de Si e DAC para 40% e 80% da CMRA são apresentadas na Figura 3A e 3B, respectivamente. As maiores AC foram obtidas aos 140 DAC na maior dose de Si (156 kg ha⁻¹), resultando em 102,83 cm para 40% CMRA e 131,2 cm para 80% CMRA (+27,60%). Esses valores representam aumentos de 49,92% e 51,69% em relação as AC obtidas na dose de 0 kg ha⁻¹ ($P \leq 0,01$), respectivamente.

Figura 3 – Superfície de resposta da altura do colmo da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água

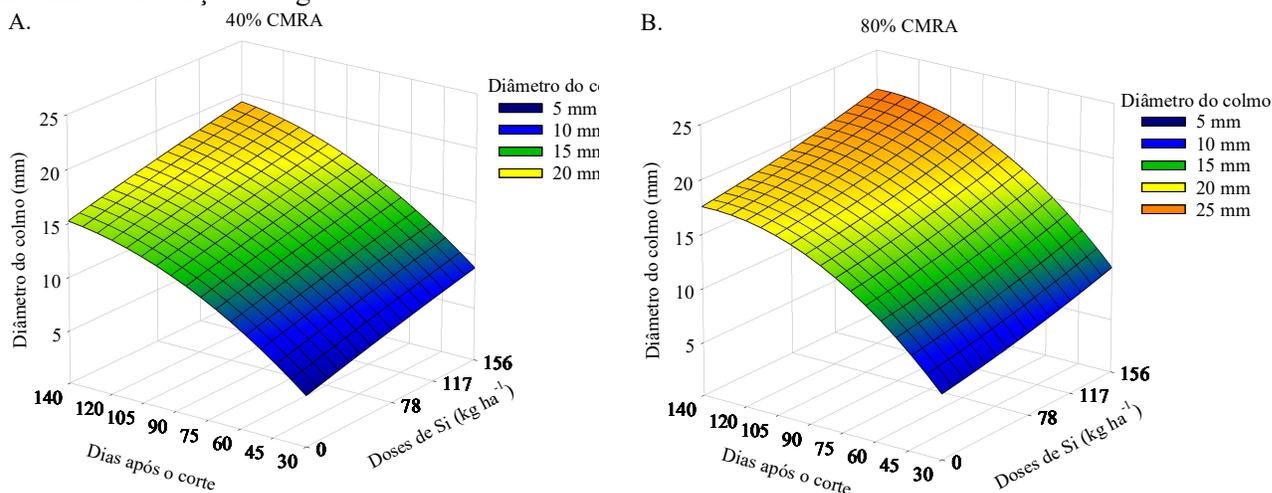


** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, ns - não significativo pelo teste F. D_{Si} – doses de Si.

De forma similar, os maiores DC foram obtidos aos 140 DAC na dose de 156 kg ha⁻¹ (Figura 4A e 4B), sendo 19,95 mm e 21,12 mm para 40% e 80% CMRA, respectivamente,

representando aumentos percentuais de 34,64% e 44,20% quando comparados aos DC obtidos na dose de 0 kg ha⁻¹ ($P \leq 0,01$), respectivamente.

Figura 4 – Superfície de resposta do diâmetro do colmo da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água



$$DC_{40\%CMRA} = 1,1658^{**} + 0,0065^{*}D_{Si} + 0,1815^{**}DAC - 0,0001^{*}D_{Si}^2 - 0,0006^{**}DAC^2 + 0,0003^{**}D_{Si} \times DAC$$

$$R^2 = 0,97 \quad CV(\%) = 3,89$$

$$DC_{80\%CMRA} = 0,3795^{**} - 0,0021^{*}D_{Si} + 0,2559^{**}DAC + 0,0001^{**}D_{Si}^2 - 0,0011^{**}DAC^2 + 0,0002^{**}D_{Si} \times DAC$$

$$R^2 = 0,96 \quad CV(\%) = 3,72$$

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, ^{ns} - não significativo pelo teste F. D_{Si} – doses de Si.

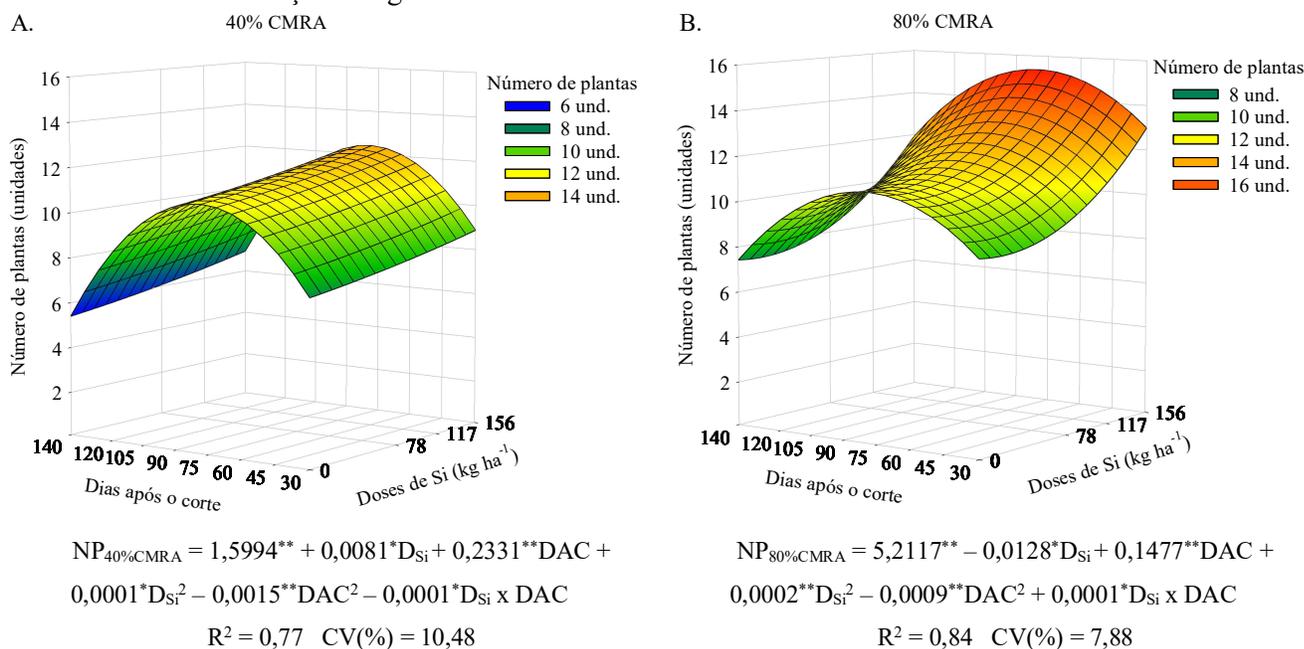
Quando as plantas são submetidas a condições de deficiência hídrica os primeiros processos a serem afetados é a inibição do crescimento, consequência direta da redução da expansão celular, síntese de parede celular e proteica, seguida pela inibição da fotossíntese e condutância estomática (TEIXEIRA et al., 2022a). Os efeitos benéficos do fornecimento de Si durante o cultivo da cana-de-açúcar refletem-se no crescimento e na produtividade das cultivares (OLIVEIRA FILHO et al., 2021b). A aplicação de Si, via solo ou via foliar, promoveu melhor desempenho de crescimento para as cultivares RB92579 e RB021754, evidenciado pelo aumento da altura das plantas, diâmetro dos colmos, maior produção de colmos e de açúcar nos estudos de Dutra et al. (2023).

Os maiores NP para 40% CMRA foram obtidos aos 78 (10,66 unid.), 75 (11,29 unid.), 74 (12,09 unid.) e 73 DAC (13,18 unid.) e para 80% CMRA foram aos 74 (10,67 unid.), 78 (11,48 unid.), 80 (12,80 unid.) e 82 DAC (14,75 unid.) nas doses de 0, 78, 117 e 156 kg ha⁻¹ ($P \leq 0,01$), respectivamente (Figura 5A e 5B). A dose de 156 kg ha⁻¹ promoveu aumentos de 24,09% (73

DAC) e 39,15% (82 DAC) quando comparada a dose de 0 kg ha⁻¹, em 40 e 80% CMRA, respectivamente.

Os resultados sugerem que sob condições de deficiência hídrica severa (40% CMRA) associada a maiores doses de Si, a planta da cana-de-açúcar investiu na formação de novos perfilhos (Figura 5) antecipando o seu ciclo vegetativo em detrimento aos resultados encontrado para 80% CMRA. Em cana-de-açúcar (RB966928) sob déficit hídrico (30% CC), Teixeira et al. (2022a) observaram aumento médio de 25% no número de plantas quando estas receberam aplicação de fertilizante silicato de sódio e potássio (113,4 g L⁻¹ de Si), via fertirrigação em comparação ao tratamento controle. Além disso, nas Figura 5A e B é possível observar que a partir dos pontos de máximo até o final do ciclo, há uma redução no número de plantas.

Figura 5 – Superfície de resposta do número de plantas da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água



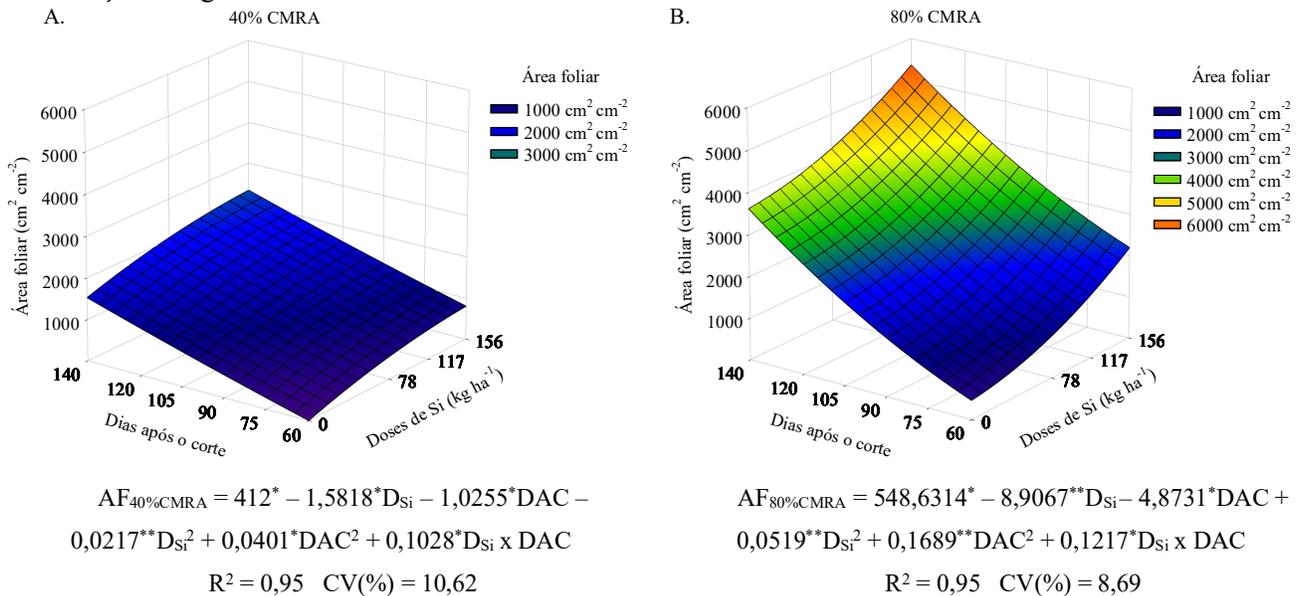
** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, ^{ns} - não significativo pelo teste F. D_{Si} – doses de Si.

Observou-se um aumento 126,10% na AF das plantas irrigadas com 80% CMRA (Figura 6A) quando comparada a 40% CMRA na dose de 156 kg ha⁻¹ ($P \leq 0,01$), sendo de 2524,69 cm² e 5708,36 cm² para 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente, aos 140 DAC.

A redução da AF em plantas sob déficit hídrico ocorre como uma estratégia para reduzir a perda de água (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005; TEIXEIRA et al., 2022a). Similar aos nossos resultados, em estudo da resposta da variedade RB966928 sob déficit hídrico (30% e

70% CC), associada a tratamentos sem e com a aplicação de fertilizante silicatado via fertirrigação, Teixeira et al. (2022a) obtiveram valores médios da AF de 4200 cm² e 6000 cm² para os tratamentos sem e com aplicação de Si, respectivamente na umidade de 30% CC aos 160 dias após o transplantio.

Figura 6 – Superfície de resposta da área foliar da cana-soca em função dos dias após o corte, sob efeito residual de doses de Si e submetida a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água.



** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e, ^{ns} - não significativo pelo teste F. D_{Si} – doses de Si.

3.3.2 Produção de massa fresca

A interação entre capacidade máxima de retenção de água (CMRA) e as doses de silício promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) nas variáveis massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do colmo (MFC) e massa fresca total da planta (MFT) conforme evidenciado pelo teste F (Tabela 3).

Tabela 3 – Análise de variância para massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do colmo (MFC) e massa fresca total da planta (MFT) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

Fonte de variação	GL	Quadrado médio		
		MFF	MFC	MFT
CMRA	1	18154,65**	131879,64**	247896,00**
Doses de Si	3	26097,95**	38344,61**	126703,05**
CMRA × Doses de Si _i	3	1735,84**	851,87**	1598,56**
Blocos	3	151,12 ^{ns}	194,60 ^{ns}	219,98 ^{ns}
Resíduo	21	690,73	162,12	185,91
CV	%	3,38	4,45	12,99

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

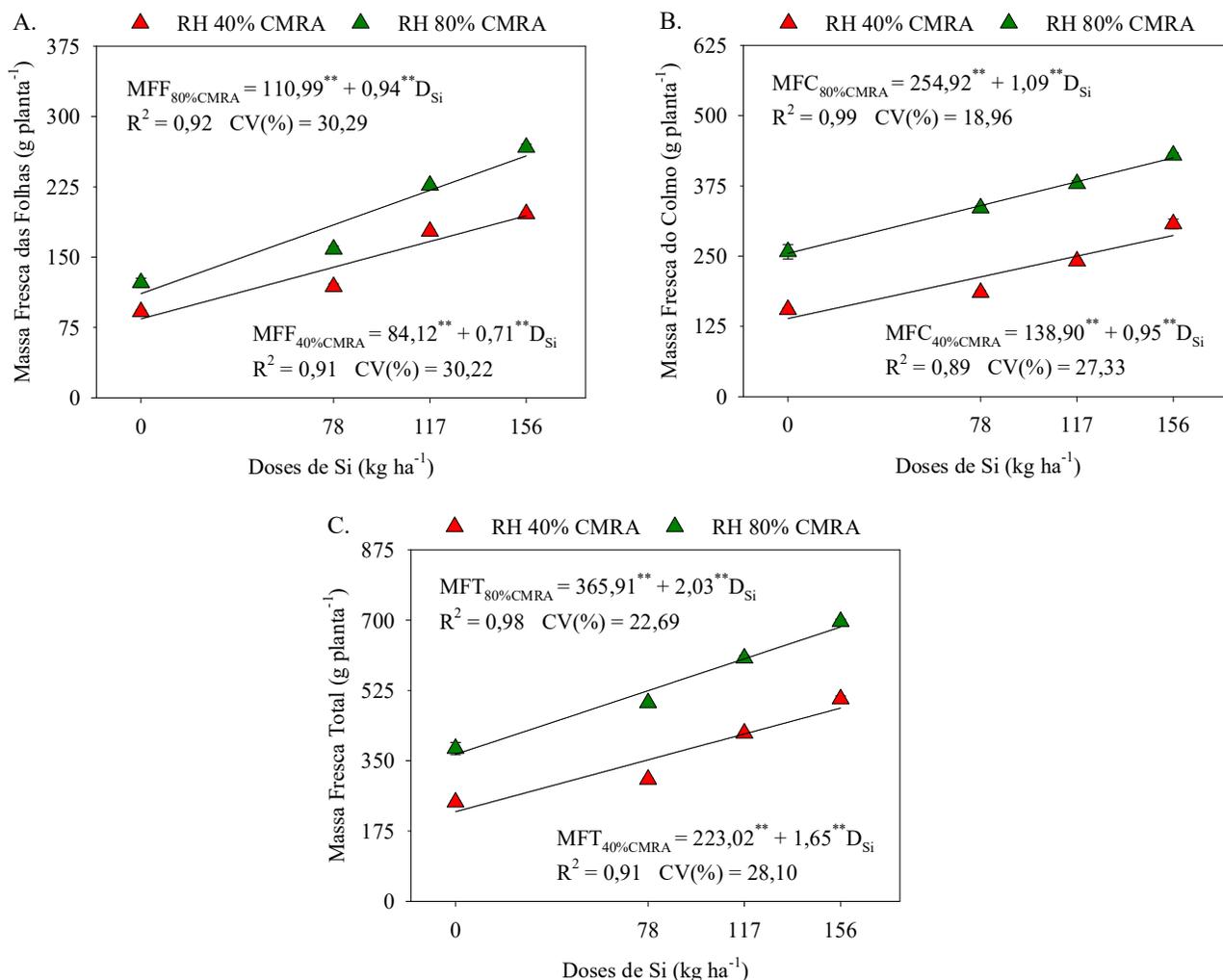
Para todas as variáveis de MFF, MFC e MFT os dados ajustaram-se a modelos lineares ($P \leq 0,05$) (Figura 7). Em 40% da CMRA, os valores médios estimados pela equação de regressão para MFF foram 84,12 e 194,28 g planta⁻¹ para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, resultando em um aumento de 130,97%. Já para 80% CMRA os valores médios foram de 110,99 e 258,07 g planta⁻¹ para as respectivas doses (Figura 7A).

A MFC das plantas irrigadas com 80% da CMRA apresentou um aumento de 48,10% (Figura 7B) quando comparada a 40% CMRA na dose de 156 kg ha⁻¹. Nos quais os maiores valores obtidos foram 286,98 e 425,01 g planta⁻¹ para 40% e 80% CMRA, respectivamente.

Os tratamentos com 40% CMRA combinado com as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹ apresentou valores médios de 223,02 e 481,25 g planta⁻¹ (+115,79), respectivamente (Figura 7C). Para 80% da CMRA os valores médios foram de 365,91 e 683,06 g planta⁻¹ (+86,67%) para as respectivas doses.

O aumento nas doses de Si promoveu ganhos na MFF e MFC, em ambas as capacidades de campo (Figura 7A e B). Esses resultados destacam os efeitos benéficos da adubação silicatada na manutenção do crescimento e produção de biomassa da cana-soca em condições de restrição hídrica (COSTA et al., 2024).

Figura 7 – Massa fresca das folhas (A), massa fresca do colmo (B) massa fresca total da planta (C) da cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coeficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

3.3.3 Relações hídricas

3.3.3.1 Potencial hídrico, potencial osmótico e potencial de turgor foliar

Na Tabela 4, observa-se efeito significativo ($P \leq 0,05$) da interação entre as capacidades máxima de retenção de água (CMRA) e as doses de silício nos componentes do potencial hídrico (Ψ_w), potencial osmótico (Ψ_o) e potencial de pressão foliar (Ψ_p) na antemanhã (antemanhã) (exceto no potencial de pressão - Ψ_p obtido ao meio-dia). Não houve efeito significativo ($P \geq 0,05$) dos fatores (CMRA e doses de Si) para o $\Psi_{p(\text{meio-dia})}$ na cana-soca conforme evidenciado pelo teste F.

Tabela 4 – Análise de variância para o potencial hídrico (Ψ_w), potencial osmótico (Ψ_s) e potencial de pressão foliar (Ψ_p) na antemanhã e ao meio-dia em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

Fonte de variação	GL	Quadrado médio					
		Ψ_w (antemanhã)	Ψ_w (meio-dia)	Ψ_o (antemanhã)	Ψ_o (meio-dia)	Ψ_t (antemanhã)	Ψ_p (meio-dia)
CMRA	1	0,0056**	0,0865**	0,0351**	0,0709**	0,0127**	0,0008 ^{ns}
Doses de Si	3	0,0087**	0,0880**	0,1132**	0,0708**	0,0596**	0,0052 ^{ns}
CMRA × Doses de Si	3	0,0001*	0,0009*	0,0014*	0,0007**	0,0013*	0,0009 ^{ns}
Blocos	3	0,0000 ^{ns}	0,0000 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,0005*	0,0002 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
Resíduo	21	0,0002	0,0003	0,0003	0,0001	0,0004	0,0004
CV	%	1,97	1,14	1,67	0,89	2,02	19,09

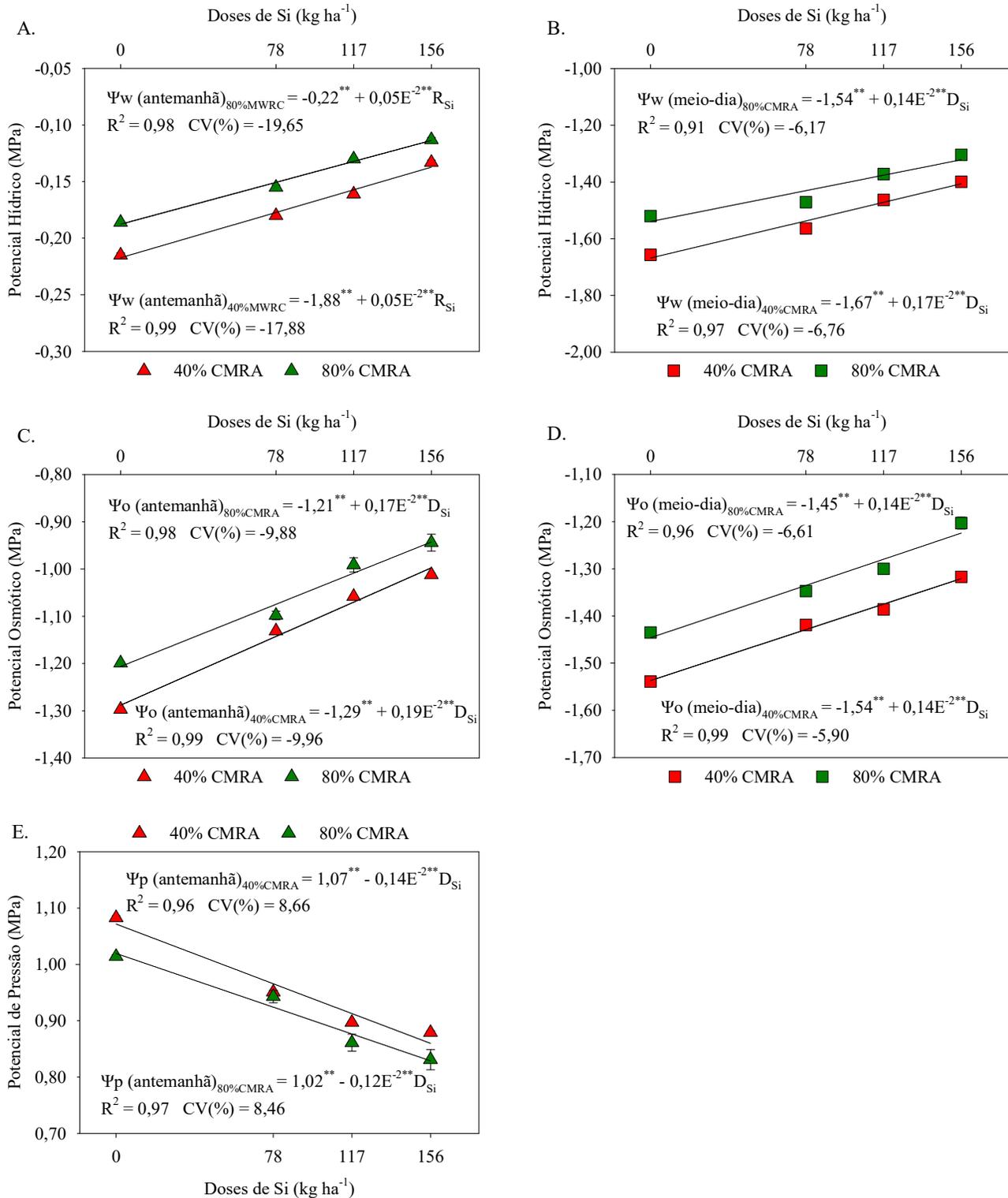
** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA- Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

As variáveis do Ψ_w e Ψ_s (antemanhã e meio-dia) ajustaram-se a modelos de regressão lineares ($P \leq 0,05$) (Figura 8). Na reposição de 40% CMRA os valores médios para o Ψ_w (antemanhã) foram -0,19 e -0,11 MPa para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente. Ao passo que em 80% CMRA esses valores foram de -0,22 MPa na dose de 0 kg ha⁻¹ e -0,14 MPa na dose de 156 kg ha⁻¹ (Figura 8A). O Ψ_w obtido ao meio dia (Figura 8B) em plantas submetidas a 40% CMRA apresentaram valores médios de -1,67 Mpa e -1,40 MPa para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto em 80% CMRA esses valores foram de -1,54 Mpa e -1,32 MPa para as respectivas doses.

Para o potencial de pressão foliar na antemanhã (Ψ_w (antemanhã)) observou-se aumentos de 0,0014 e 0,0012 MPa para cada incremento unitário das doses para 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 8E). No 40% CMRA os valores médios estimados para o Ψ_p (antemanhã) foram 1,07 Mpa e 0,85 Mpa (-20,38%) para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto em 80% CMRA para as respectivas doses esses valores foram de 1,02 Mpa e 0,83 MPa (-18,36%).

Os potenciais foliares hídricos e osmóticos responderam de forma positiva a adubação silicatada, considerando que nos dois horários avaliados (antemanhã e meio-dia) houve um aumento linear com o incremento das doses de Si para as duas umidades (40 e 80% da CMRA). Os melhores resultados foram observados para 80% da CMRA. Os menores valores dos potenciais ao meio-dia indicam o efeito da transpiração foliar. É importante destacar que, mesmo sob déficit hídrico o Si foi eficiente para melhorar a hidratação da planta em função do aumento do potencial hídrico.

Figura 8 – Potencial hídrico na antemanhã (A), potencial hídrico ao meio-dia (B), potencial osmótico na antemanhã (C) e potencial osmótico ao meio-dia (D), potencial de pressão foliar (E) da cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

Pesquisa avaliando a variedade RB966928 sob déficit hídrico (30% e 70% CC), sem e com aplicação de fertilizante silicatado (113,4 g.L⁻¹ de Si) via fertirrigação, estomática (TEIXEIRA et al., 2022a) observaram valor médio do Ψ_w foliar na antemã de -0,20 MPa em ambas as condições de regime hídrico com a presença da adubação silicatada. No mesmo trabalho também foi encontrado valor médio do Ψ_w foliar de -1,60 MPa ao meio-dia, corroborando com os achados do presente estudo. Os valores mais elevados do Ψ_w na antemã (Figura 8A) demonstram a capacidade de reidratação das plantas mesmo em condições de deficiência hídrica devido a reduzida taxa de transpiração, aliada a maior frequência de irrigação.

Plantas em estresse hídrico podem desenvolver estratégias para manter a atividade fisiológica, embora isso acarrete altos custos energéticos. Um dos principais gastos de energia se dá para acumular solutos no citoplasma e no vacúolo das células vegetais, permitindo, que elas mantenham o potencial de turgor mesmo sob baixos potenciais hídricos (TEIXEIRA et al., 2022a). Ainda de acordo com esses autores, outra estratégia é investir no crescimento de raízes e/ou formar vasos (xilema) para aumentar a capacidade de absorção de água.

3.3.3.2. Ajustamento osmótico, extravasamento eletrólitos, teor relativo de água e suculência foliar

A variável ajustamento osmótico total (AOt) apresentou efeito significativo ($P \leq 0,01$) para o fator dose (Tabela 5). Houve efeito significativo da interação ($P \leq 0,01$) entre a CMRA e as doses para o extravasamento de eletrólitos (PEE), o teor relativo de água (TRA) e a suculência foliar (SF) na cana-soca.

Tabela 5 – Análise de variância para o ajustamento osmótico total (AOt), extravasamento de eletrólitos (EE), teor relativo de água (TRA) e suculência foliar (SF) em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

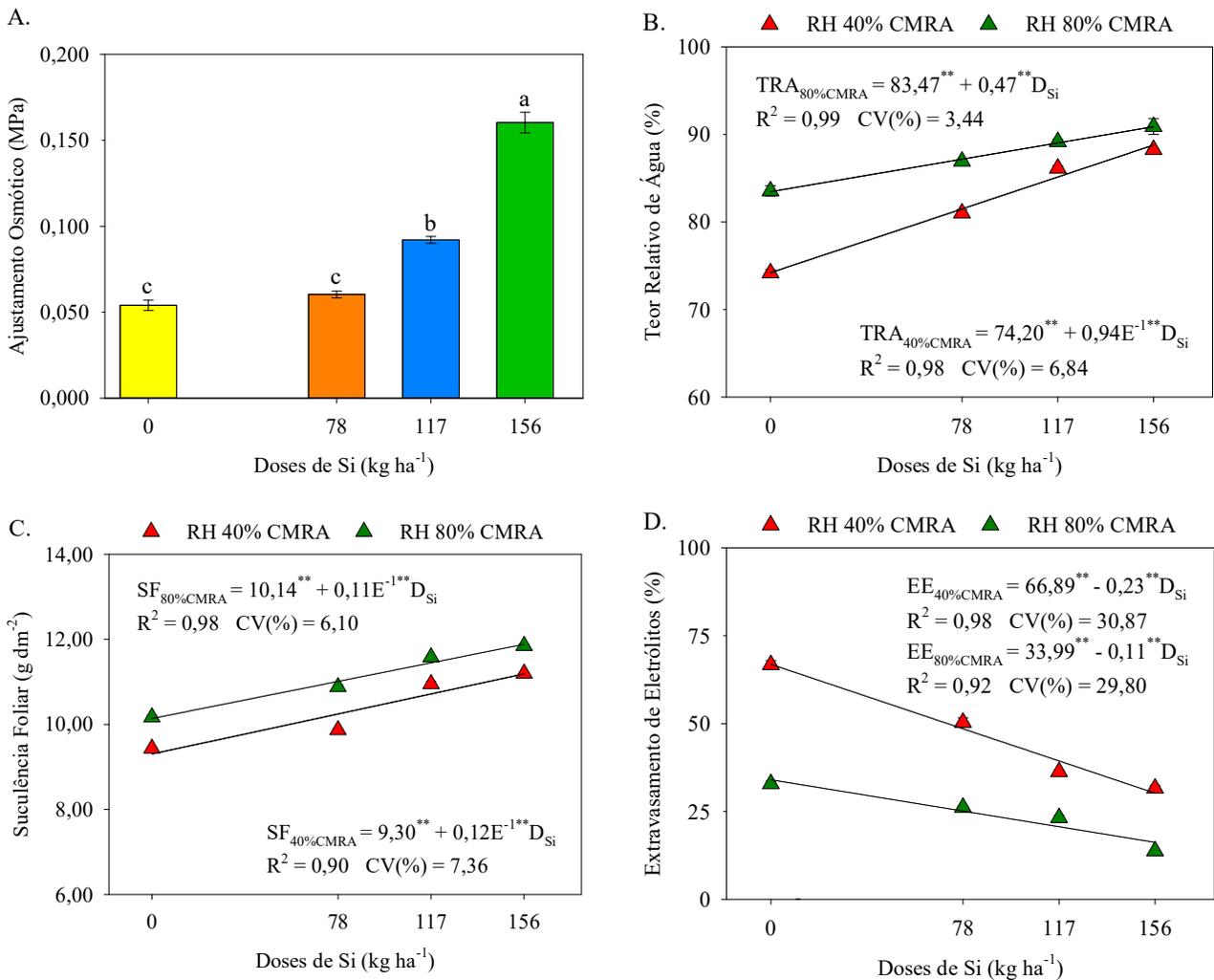
Fonte de variação	GL	Quadrado médio			
		AOt	EE	TRA	SF
CMRA	1	-	3961,61**	219,61**	4,5829**
Doses de Si	3	0,0095**	1091,06**	178,17**	5,1129**
CMRA × Doses de Si	3	-	162,25**	19,46**	0,0604**
Blocos	3	0,0000 ^{ns}	1,93 ^{ns}	2,28 ^{ns}	0,0039 ^{ns}
Resíduo	21	0,0000	2,65	0,64	0,0052
CV	%	9,12	4,64	2,95	0,67

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

Para o AOt observou-se um aumento 196% na dose de 156 kg ha⁻¹ (0,1603 MPa) quando comprada a dose de 0 kg ha⁻¹ (0,0540 MPa) (Fig. 9A). As variáveis TRA, SF e EE ajustaram-

se a modelos de regressão lineares ($P \leq 0,05$) conforme Figura 9. Observou-se aumentos no TRA de 19,68% (40% CMRA) e 8,90% (80% CMRA) ao comparar as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹ de Si (Fig. 9B). Na Fig. 9C, a SF apresentou aumento de 20,29% entre as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹ com 40% CMRA e 7,93% com 80% CMRA. Na Figura 9D, observou-se que em 40% CMRA, os valores do EE foram 66,89% e 30,18% (-54,88%), nas doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto em 80% CMRA para as respectivas doses foram de 34,00% e 16,20% (-52,35).

Figura 9 – Ajustamento osmótico total (A), teor relativo de água (B), suculência foliar (C) e extravasamento de eletrólitos (D) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$) e as letras o teste de Tukey a $P \leq 0,05$. D_{Si} – doses de Si.

Em plantas de cana-de-açúcar sob estresse por deficiência hídrica, estudos (TEIXEIRA et al., 2022a, 2022b; VERMA et al., 2019a, 2020) têm sugerido que o Si pode ser um indutor desses mecanismos, uma vez que incrementa o potencial hídrico celular, conteúdo de prolina, atividade de enzimas responsáveis pelo sistema de defesa antioxidante (CAT, SOD e APX) e compostos fenólicos, além do decréscimo da peroxidação lipídica e danos oxidativos.

O AOT é a capacidade das células vegetais de acumular e/ou sintetizar solutos, e usá-los para reduzir o Ψ_s , conseqüentemente diminuindo o Ψ_w durante períodos de estresse (TEIXEIRA et al., 2022b), principalmente por deficiência hídrica. O ajuste envolve um aumento do conteúdo de solutos na célula, que pode ser feito duas maneiras, uma envolvendo acumulação de íons nos vacúolos e a outra a acumulação de aminoácidos e açúcares no citosol (VERMA et al., 2019a, 2020), esse aumento desempenha um papel importante na osmorregulação das células (Figura 9A), além de ativar enzimas envolvidas na respiração e fotossíntese. Ainda de acordo com os autores, outra estratégia é investir no crescimento de raízes e/ou formar vasos (xilema) para aumentar a capacidade de absorção de água.

No presente estudo, o potencial de pressão positivo (Figura 8E) sugere uma estratégia das plantas de cana-soca em manter o crescimento das células vegetais, uma vez que esse processo requer pressão de turgor para estender as paredes celulares, além disso, aumentar a rigidez mecânica das células e tecidos.

Estudos indicam que o aumento TRA e SF sob grave déficit hídrico é atribuído à proteção proporcionada pela atividade de proteínas como as aquaporinas, especializadas na absorção de água pelas plantas, e cuja expressão gênica é estimulada por Si (OLIVEIRA FILHO et al., 2021a; TEIXEIRA et al., 2022a, 2022b, 2022c). Ainda de acordo com os autores citados, o Si além de favorecer a manutenção do teor de água e suculência foliar nas plantas sob déficit hídrico, mantém o potencial hídrico foliar e modula a atividade das aquaporinas. Adicionalmente, reduz as perdas de água, devido à barreira física de sílica acumulada na epiderme. Aos 160 dias, Teixeira et al. (2022c) avaliando a variedade RB966928 sob déficit hídrico (30% e 70% CC), sem e com aplicação de 113,4 g.L⁻¹ de Si via fertirrigação, obtiveram teor relativo de água de 93% e 85% para plantas sob 70% CC e 30% CC, respectivamente.

O índice de extravasamento de eletrólitos celulares (Figura 9D) reduziu com o incremento das doses nos diferentes níveis de déficit hídrico. Este efeito do Si está relacionado com a menor produção de peróxido de hidrogênio, subproduto da peroxidação lipídica que causa danos na membrana das células (TEIXEIRA et al., 2020). Portanto, o Si reduziu os danos causados pelo déficit hídrico, proporcionando maior integridade física das membranas celulares pelo acúmulo de sílica amorfa. Índice de extravasamento de eletrólitos na ordem de 15% e 20% foram

observados em plantas submetidas a estresse hídrico (30% CC), com e sem adubação silicatada, respectivamente (TEIXEIRA et al., 2022b).

3.4 Conclusões

O efeito residual de doses de Si, proveniente de fertilizante à base de sílica amorfa no solo, promoveu aumentos significativos na altura do colmo, diâmetro do colmo, área foliar, biomassa fresca das plantas da cana sob estresse hídrico, esses resultados atenderam todos os objetivos, assim como, respondeu todas as hipóteses de maneira positiva. Esses efeitos estão associados ao aumento no teor relativo de água, à redução no extravasamento de eletrólitos e aumento do potencial hídrico foliar, sugerindo que esses fatores são mecanismos de resposta aos efeitos positivos do Si residual no solo em cana-soca submetida a estresse hídrico. Os resultados gerados por esta pesquisa possibilitam uma melhor compreensão dos impactos do déficit hídrico, bem como os benefícios do efeito residual do Si na mitigação do estresse hídrico na cana-de-açúcar, fornecendo critérios técnicos para promover o manejo mais eficiente, econômico e sustentável em regiões onde a cultura é impactada pela escassez de água.

Referências Bibliográficas

AAPFCO. Association of American Plant Food Control Officials. **In official publication: AAPFCO**, Publ. n. 67. In: J.V. Slater (ed.) West Lafayette. 2014. 95p.

ALVES, E. S.; LIMA, D. F.; BARRETO, J. A.S.; SANTOS, D. P.; SANTOS, M. A. L. Determinação do coeficiente de cultivo para a cultura do rabanete através de lisimetria de drenagem. **IRRIGA**, v. 2, p. 194-203, 2017. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p194-203>

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

BEZERRA, B. K. L.; LIMA, G. P. P.; REIS, A. R.; SILVA, M. A.; CAMARGO, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

BLUM, A. Osmotic adjustment and growth of barley cultivars tation to water deficit in chickpea breeding lines by osmoregulation, under drought stress. **Crop Sci.**, v. 29, p. 230–233, 1989. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010052x>

BRAGA JUNIOR, R. L. C.; LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; KANTHACK, R. A. D.; SILVA, D. N.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N.; SILVA, V. H. P.; RODRIGUES, P. E.; CARREGARI, H. R.; ANJOS, I. A. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - safra 2022/23**. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 235). 2023. 71p.

CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81-91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, v. 13, p. 3691-3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, v. 167, p. 64–75, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2.ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco, 2008. 198p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.12 - safra 2024/2025 - Terceiro levantamento. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 26 janeiro 2025.

COSTA, M. G.; MELLO PRADO, R.; PALARETTI, L. F.; SOUZA JÚNIOR, J. P. The effect of abiotic stresses on plant C:N:P homeostasis and their mitigation by silicon. **The Crop Journal**, v. 12, p. 340–353, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>

DELFT, E. M. Transpiration in succulent plants. **Annals of Botany**, v. 26, p. 409-442, 1912.

DINH, T. H. K.; WATANABE, K.; TAKARAGAWA, H.; NAKABARU, M.; KAWAMITSU, Y. Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. **Plant Production Science**, v. 20, p. 412–422, 2017. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>

DUTRA, A. F.; LEITE, M. R. L.; MELO, C. C. F.; AMARAL, D. S.; SILVA, J. L. F.; MELLO PRADO, R.; PICCOLO, M. C.; MIRANDA, R. S.; SILVA JÚNIOR, G. B.; SOUSA, T. K. S. A.; MENDES, L. W.; ARAÚJO, A. S. F.; ZUFFO, A. M.; ALCÂNTRA NETO, F. Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, v. 13, p. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z>

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, n 1, p. 641-664, 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Food and Agriculture - Statistical pocketbook** 2019. Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca6463en/ca6463en.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

GOKAVI, N.; JAYAKUMAR, M.; MOTE, K.; SURENDRAN, U. Diatomaceous earth as a source of silicon and its impact on soil physical and chemical properties, yield and quality, pests and disease incidence of *Arabica Coffee* cv Chandragiri. **Silicon**, v. 13, p. 4583–4600, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00767-w>

HERMANN, E. R., CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista STAB -Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 17, n. 2, p. 32-34, 1999.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The Water-culture Method for Growing Plants Without Soil**. California: University of California, p. 32, 1950.

INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, v. 134, p. 95-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.004>

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, p. 185-202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

IPNI. International Plant Nutrition Institute. **Nutri-facts**. Silicon. n.14. 2015.

JINGER, D.; DEVI, M. T.; DHAR, S.; DASS, A.; SHARMA, V. K.; KUMAR, V.; JOSHI, E.; JATAV, H. S.; SINGH, N. Silicon application mitigates abiotic stresses in rice: A review. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 90, p 2043-2050, 2020. <https://doi.org/10.56093/ijas.v90i11.108557>

JOHNSON, S. N.; CHEN, Z.; ROWE, R. C.; TISSUE, D. T. Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 4444, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>

KATZ, O.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; PRAKASH, N. B.; SCHALLER, J. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants**, v. 10, p. 652, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>

KOVÁCS, S.; KUTASY, E.; CSAJBÓK, J. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. **Plants**, v. 11, p. 1-22, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S.; MACHADO, E. C.; LANDELL, M. G. A. Biometric and physiological responses to water deficit in sugarcane at different phenological stages. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1575-1582, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>

MIR, R. A.; BHAT, B. A.; YOUSUF, H.; ISLAM, S. T.; RAZA, A.; RIZVI, M. A.; CHARAGH, S.; ALBAQAMI, M.; SOFI, P. A.; ZARGAR, S. M. Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p 1–26, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>

MOSTOFA, M. G.; RAHMAN, M.; ANSARY, M. U.; KEYA, S. S.; ABDELRAHMAN, M.; MIAH, G.; TRAN, L. P. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 41, p. 918–934, 2021. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582>

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; ARAÚJO, J. C. T.; LINS, S. A. S. Efficiency and recovery index of silicon of a diatomaceous Earth-based fertilizer in two soil types grown with sugarcane and maize. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 16, p. 2347–2358, 2021. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918157>

NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; LIMA, L. H. V.; SILVA, J. R.; VELOSO, V. L.; SILVA, F. L.; FREITAS, S. T.; SANTOS, L. F.; SANTOS, M. A. Silicon Application to Soil Increases the Yield and Quality of Table Grapes (*Vitis vinifera* L.) Grown in a Semiarid Climate of Brazil. **Silicon**, v. 15, p. 1647-1658, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-02129-0>

PRONASOLOS. Programa Nacional de Solos do Brasil. Solos do Brasil. Disponível: <<http://pronasolos.agenciazetta.ufla.br/solos-do-brasil>>. Acesso em: 28/07/2024.

OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; MELLO PRADO, R.; TEIXEIRA, G. C. M.; PICCOLO, M. C.; ROCHA, A. M. S. Water deficit modifies C:N:P stoichiometry affecting sugarcane and energy cane yield and its relationships with silicon supply. **Scientific Reports**, v. 11, p. 1-10, 2021b. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00441-0>

OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; MELLO PRADO, R.; TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; SOUZA JUNIOR, J. P.; PICCOLO, M. C.; ROCHA, J. R. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N:P stoichiometry and its use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 255, p. 107006, 2021a.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>

OLIVEIRA; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. RIDESA, Curitiba. 2021.

PAULINO, M. K. S. S.; SOUZA, E. R.; LINS, C. T.; DOURADO, P. R. M.; LEAL, L. Y. C.; MONTEIRO, D. R.; REGO JUNIOR, F. E. A.; SILVA, C. U. C. Influence of vesicular trichomes of *Atriplex nummularia* on photosynthesis, osmotic adjustment, cell wall elasticity and enzymatic activity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 155, p. 177-186, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.036>

PRAKASH, N. B.; ANITHA, M. S.; SANDHYA, K. Behaviour of Different Levels and Grades of Diatomite as Silicon Source in Acidic and Alkaline Soils. **Silicon**, v. 11, p. 2393–2401, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9373-9>

SANTOS, F.; EICHLER, P.; MACHADO, G.; MATTIA, J.; SOUZA, G. Chapter 2: By-products of the sugarcane industry. **Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives**, v. 1, p. 21-48, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00002-0>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, p. 532, 2018.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 13.ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, p.410, 2022.

SOM-ARD, J.; ATZBERGER, C.; IZQUIERDO-VERDIGUIER, E.; VUOLO, F.; IMMITZER, M. Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review. **Remote sensing**, v. 13, p. 4040, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13204040>

SOMMER, M. KACZOREK, D.; KUZYAKOV, Y.; BREUER, J. Silicon pools and fluxes in soils and landscapes - a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 310-329, 2006. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>

STATSOFT. INC. Statistica: data analysis software system, version 10.0. 2010.

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; SOUSA JÚNIOR, G. S.; GRATÃO, P. L. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports**, v. 12, p. 17487, 2022b. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. C. Root-and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **Plos One**, v. 15, n. 10, p. 1-24, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. C. Silicon as a sustainable option to increase biomass with less water by inducing carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometric homeostasis in sugarcane and energy cane. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1-18, 2022a. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; SOUSA JUNIOR, G. S.; LUPINO, P. Beneficial Effect of Silicon Applied Through Fertigation Attenuates Damage Caused by Water Deficit in Sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 41, p. 3255-3270, 2022c. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>

TURNER, N. C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil**, v. 58, p. 339-366, 1981. <https://doi.org/10.1007/bf02180062>

VASQUEZ-TELLO, A.; ZUILY-FODIL, Y.; PHAM THI, A. T.; VIEIRA DA SILVA, J. B. Electrolyte and Pi Leakages and Soluble Sugar Content as Physiological Tests for Screening Resistance to Water Stress in Phaseolus and Vigna Species. **Journal of Experimental Botany**, v. 41, p. 827–832, 1990. <https://doi.org/10.1093/jxb/41.7.827>

VERMA, K. K.; LIU, X.; WU, K.; SINGH, R. K.; SONG, Q.; MALVIYA, M. K.; SONG, X.; SINGH, P.; VERMA, C. L.; LI, Y. The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon**, v. 12, p. 1355–1367, 2019a. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00228-z>

VERMA, K. K.; SINGH, R. K.; SONG, Q.; SINGH, P.; ZHANG, B.; SONG, X.; CHEN, G.; LI, Y. R. Silicon alleviates drought stress of sugarcane plants by improving antioxidant responses. **Biomedical Journal of Scientific & Technical**, v. 17, n. 1, p. ID. 00295712580-12586, 2019b. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.17.002957>

VERMA, K. K.; SONG, X.; LI, D.; SINGH, M.; RAJPUT, V. D.; MALVIYA, M. K.; MINKINA, T.; SINGH, R. K.; SINGH, P.; LI, Y. Interactive role of silicon and plant–rhizobacteria mitigating abiotic stresses: A new approach for sustainable agriculture and climate change. **Plants**, v. 9, p. 1223, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9091055>

ZHAO, D.; LI, Y. Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy**, v. 2015, p. 547386, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/547386>

4. CAPÍTULO III: PERFORMANCE FOTOSSINTÉTICA DA CANA-SOCA EM FUNÇÃO DO EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO SILICATADA

Resumo

A redução na taxa fotossintética é a principal causa da redução do crescimento e da produtividade das plantas de cana-de-açúcar em condições de déficit hídrico. Uma estratégia para reduzir os danos causados pela seca é o uso de silício (Si) que promove a regulação dos sistemas de defesa antioxidante enzimático, aumenta os teores dos pigmentos fotossintéticos, a eficiência fotoquímica e, conseqüentemente, a taxa fotossintética e o crescimento da planta. Nesse sentido, essa pesquisa teve como objetivo avaliar as respostas fisiológicas, a eficiência fotoquímica do fotossistema II e os pigmentos fotossintéticos ao efeito residual do fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA) na mitigação dos danos causados pelo estresse hídrico em cana-soca. O experimento foi conduzido em blocos inteiramente casualizados com esquema fatorial 4 x 2, com quatro repetições, sendo os tratamentos correspondentes a quatro doses residuais de fertilizante derivado de sílica amorfa ($DSi = 0,0; 78,0; 117,0$ e $156,0 \text{ kg ha}^{-1}$ de Si) e dois níveis de umidade do solo (CMRA = 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água). Realizaram-se avaliações nos parâmetros bioquímicos (fluorescência da clorofila, eficiência quântica fotoquímica - Fv/Fm , quantificação de clorofila - Chl $a+b$ e carotenoides) e fisiológicos (fotossíntese líquida - A, transpiração - E, condutância estomática - Gs, concentração interna de CO_2 - Ci, eficiência instantânea no uso de água - EUA). Aos 140 DAC a razão Fv/Fm apresentou valores de 0,66 e 0,71 para 40 e 80% da CMRA, respectivamente, na dose de 156 kg ha^{-1} . Os teores de Chl $a+b$ apresentaram aumentos de 66,28% (40% da CMRA) e 55,21% (80% da CMRA) na dose 156 kg ha^{-1} comparada à 0 kg ha^{-1} . Aos 140 DAC, o regime hídrico de 80% da CMRA com 156 kg ha^{-1} promoveu aumentos na A $29,35 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (+16,93%), E $8,95 \text{ mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (+25,35%) e Ci 115,70 ppm (+34,46%), em relação a 40% CMRA. Conclui-se que o efeito residual das doses crescentes atenuou os efeitos do estresse hídrico por possibilitar melhorias nas trocas gasosas, pigmentos fotossintéticos e eficiência fotossintética.

Palavras-chaves: Eficiência fotossintética. Estresse abiótico. Clorofilas. *Saccharum officinarum* L.. Sílica amorfa.

CAPÍTULO III: PHOTOSYNTHETIC PERFORMANCE OF RATOON SUGARCANE AS A FUNCTION OF THE RESIDUAL EFFECT OF SILICATE FERTILIZATION

Abstract

The reduction in photosynthetic rate is the main cause of decreased growth and productivity in sugarcane plants under water deficit conditions. A strategy to mitigate drought-induced damage is the use of silicon (Si), which promotes the regulation of enzymatic antioxidant defense systems, increases photosynthetic pigment content, photochemical efficiency, and consequently, the photosynthetic rate and productivity. In this context, this research aimed to evaluate the physiological and biochemical responses, the photochemical efficiency of photosystem II, and photosynthetic pigments under the residual effect of a fertilizer derived from amorphous silica (ASF) in mitigating drought stress damage in ratoon sugarcane. The experiment was conducted in a completely randomized block design with a 4×2 factorial scheme and four replications. The treatments consisted of four residual doses of amorphous silica-derived fertilizer (Si doses = 0.0, 78.0, 117.0, and 156.0 kg ha⁻¹ of Si) and two soil moisture levels (MWRC = 40% and 80% of the soils maximum water retention capacity). Biochemical parameters (chlorophyll fluorescence, photochemical quantum efficiency - Fv/Fm, chlorophyll content - Chl a+b, and carotenoids) and physiological parameters (photosynthesis - A, transpiration - E, stomatal conductance - Gs, internal CO₂ concentration - Ci, instantaneous water use efficiency - WUE) were evaluated. At 140 DAE, the Fv/Fm ratio showed values of 0.66 and 0.71 for 40% and 80% MWRC, respectively, at the dose of 156 kg ha⁻¹. Chl a+b content increased by 66.28% (40% MWRC) and 55.21% (80% MWRC) at the 156 kg ha⁻¹ dose compared to 0 kg ha⁻¹. At 140 DAE, the 80% MWRC regime with 156 kg ha⁻¹ resulted in increases in A 29,35 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (+16,93%), E 8,95 $\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (+25,35%), and Ci 115,70 ppm (+34,46%) compared to 40% MWRC. It is concluded that the residual effect of Si mitigated water stress effects by improving gas exchange, photosynthetic pigments, and photosynthetic efficiency.

Keywords: Chlorophylls. Photosynthetic efficiency. Abiotic stress. *Saccharum officinarum* L.. Amorphous silica.

4.1 Introdução

O Brasil destaca-se no cenário agrícola, ocupando a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar. De acordo com a CONAB (2024), na safra 2024/2025 a área colhida no país estimada é de 8,7 milhões de hectares, indicando um volume de produção de 678,67 milhões de toneladas, correspondente mais 45% do total mundial. No país, a estimativa de redução é de 4,8% em relação à safra anterior, em consequência dos baixos índices pluviométricos e das altas temperaturas na região Centro-Sul, no entanto, as projeções apontam que os efeitos das mudanças climáticas podem promover reduções de até 20% nas próximas décadas.

O Semiárido brasileiro abrange uma área de 1,56 milhões de km², correspondente a 61,7% da Região Nordeste e, caracterizado principalmente pela irregularidade na distribuição espaço-temporal das chuvas (300 a 800 mm ano⁻¹) (ALVARES et al., 2013; SUDENE, 2021). Nessa região, os sistemas de produção de sequeiro são utilizados em mais de 70% das áreas cultivadas com cana-de-açúcar (ANA, 2023), embora a cultura apresente exigência hídrica entre 1500 e 2500 mm por ciclo vegetativo (DOORENBOS; KASSAM, 1979; FAO, 2019), em consequência disso, a produtividade estimada da safra 2024/2025 é de 62,75 Mg ha⁻¹, abaixo da nacional (78,05 Mg ha⁻¹) de acordo com levantamento da CONAB (2024).

Pesquisas realizadas por Camargo et al. (2019) e Teixeira et al. (2022a, 2022b) evidenciam que a cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico é mais sensível durante a fase inicial de formação do colmo, período em que os efeitos negativos do estresse hídrico são mais intensos e, podem comprometer significativamente o desenvolvimento da cultura. As respostas fisiológicas e bioquímicas na cana-de-açúcar ao estresse hídrico são amplamente estudadas, destacando-se a redução nos teores de clorofila a clorofila b e carotenoides, a menor eficiência quântica do fotossistema II (FSII) e a limitação das trocas gasosas foliares (BEZERRA et al., 2019; TEIXEIRA; MELLO PRADO; ROCHA, 2021; VERMA et al., 2019).

A redução na taxa fotossintética é a principal causa da limitação no crescimento e produtividade das plantas de cana-de-açúcar em condições de déficit hídrico (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005), devido à redução da expansão foliar, fechamento estomático (causando aumento da temperatura e redução da concentração interna de CO₂) e mudanças na alocação de carbono (VERMA et al., 2021; OLIVEIRA FILHO et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022b). Essas limitações na assimilação de CO₂ promovem um desequilíbrio no rendimento quântico máximo do FSII, pela inibição ou danos processo de transferência de elétrons do FSII e na biossíntese de pigmentos fotossintéticos (SILVA; PINCELLI; BARBOSA, 2018; TEIXEIRA et al., 2022b), consequentemente, induz a biossíntese de espécies reativas de oxigênio (ERO's) e danos oxidativos (HUSSAIN et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2022a).

O uso do silício (Si) tem se destacado como uma estratégia eficaz na mitigação dos efeitos nocivos dos estresses abióticos, exemplo do déficit hídrico. O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta, sendo na forma de dióxido de silício (SiO_2) que compreende 50-70% da massa do solo (EPSTEIN, 1994). No entanto, o SiO_2 é indisponível para absorção pelas plantas. O Si disponível na solução do solo para absorção é encontrado em baixas concentrações ($\sim 1 \text{ mmol L}^{-1}$ ou $28,09 \text{ mg dm}^{-3}$), na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) (KATZ et al., 2021).

A presença de Si sob condições de estresse reduz a degradação dos pigmentos fotossintéticos, promovendo o aumento nos teores de Chl a Chl b e carotenoides. Esse efeito é atribuído ao aumento no tamanho dos cloroplastos, ao maior número de grana nas folhas e à preservação da integridade dos tilacoides, contribuindo para a manutenção da eficiência fotossintética. Esses mecanismos foram demonstrados em diferentes estudos (FENG et al., 2010; GOU et al., 2020; HUSSAIN et al., 2021a; MUSTAFA et al., 2021; SONG et al., 2014; XIE et al., 2014).

Além disso, foi relatada uma melhora na eficiência do FSII devido à regulação positiva dos genes relacionados a esse complexo, resultando em um aumento na taxa fotossintética (Teixeira et al., 2020; ZHANG et al., 2018). Esse efeito é atribuído à ativação de mecanismos de defesa que reduzem os níveis de espécies reativas de oxigênio, responsáveis pela oxidação de pigmentos fotossintéticos e pela degradação das membranas celulares (KIM et al., 20217; MOSTOFA et al., 2021).

A compreensão das respostas fisiológicas e bioquímicas da cana-de-açúcar ao estresse hídrico e à aplicação de Si em diferentes ciclos é crucial para aprimorar o manejo da fertilização silicatada. Embora os efeitos da seca e os benefícios do silício na mitigação de estresses abióticos sejam bem conhecidos, o efeito residual da adubação silicatada sob déficit hídrico ainda é pouco explorado. Camargo et al. (2021) avaliaram o índice de recuperação de Si aplicado no ciclo de cana-planta e encontraram um valor médio de 43% de recuperação de Si em dois ciclos consecutivos (cana-planta e cana-soca). Estudos nessa área oferecem novas perspectivas para a fertilização com Si, possibilitando o desenvolvimento de estratégias que promovam maior produtividade e sustentabilidade a longo prazo.

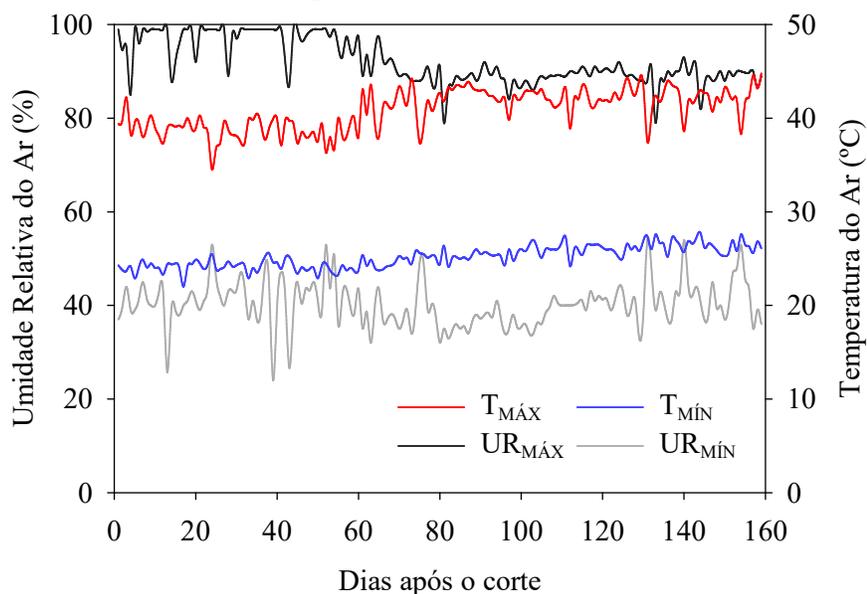
Nesse contexto, a hipótese desta pesquisa é que a aplicação de fertilizante silicatado em cana-planta promove aumentos nas concentrações de pigmentos fotossintéticos, melhorando a eficiência fotossintética e as trocas gasosas em condições de déficit hídrico. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar as respostas fisiológicas, eficiência fotoquímica e pigmentos fotossintéticos ao efeito residual do fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA) na mitigação dos danos causados pelo estresse hídrico em cana-soca.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo e caracterização das unidades experimentais

O experimento foi realizado em casa de vegetação, ambiente protegido, na Universidade Federal Rural de Pernambuco, na cidade de Recife – PE, Brasil, onde as coordenadas geográficas são 8° 04' 03" de latitude Sul e 34° 55' 00" de longitude Oeste, e altitude de 4 m. As temperaturas e umidades durante o experimento (Figura 1) foram mensurados por um termo-higrômetro digital (Modelo INCOTERM-7666.02.0.00).

Figura 1 – Dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar ao longo do período experimental de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Fonte: autoral.

As unidades experimentais foram compostas por vasos preenchido de forma sequencial com uma camada de brita de 19 mm, uma manta geotêxtil Bidim RT-08 e 90 kg de solo. O solo utilizado no experimento foi coletado na camada correspondente a 0-20 cm de um Argissolo Amarelo Distrocoeso de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2018), equivalente ao Ultisol Yellow Eutrophic na classificação U.S. Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 2022). Os Argissolos abrangem cerca de 24% do território brasileiro (PRONASOLOS, 2024) e são amplamente empregados no cultivo de cana-de-açúcar. Após o corte da planta aos 150 dias, o solo foi analisado e realizado uma nova adubação (Tabela 1) com solução nutritiva de macro e micronutrientes, solução adaptada de Hoagland e Arnon

(1950). A necessidade da cultura foi remediada de acordo com a Recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco, Brasil (CAVALCANTI et al., 2008).

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas do Argissolo Amarelo Distrocoeso utilizado no experimento

Propriedades químicas	Valor	Propriedades físicas	Valor
pH (H ₂ O)	6,10	Dp (g cm ⁻³)	2,52
P (mg dm ⁻³)	130,75	Ds (g cm ⁻³)	1,45
Si ácid. acéti. (mg dm ⁻³)		PT (%)	42,46
K (cmol _c dm ⁻³)	0,16	Areia (g kg ⁻¹)	705
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,28	Silte (g kg ⁻¹)	79
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,00	Argila (g kg ⁻¹)	216
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,36		
Al + H (cmol _c dm ⁻³)	3,56		
CTC (cmol _c dm ⁻³)	9,4		
V (%)	61		

Dp: densidade de partículas; Ds: densidade do solo; P: porosidade total; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação de bases ($V = (SB / t) \times 100$).

No ciclo de cana-planta, foi cultivada a variedade RB041443 (*Saccharum officinarum* L.), recomendada para sistemas irrigados ou de sequeiro, apresentando crescimento ereto, baixa incidência de florescimento e elevada produtividade (OLIVEIRA; HOFFMANN; BARBOSA, 2021).

4.2.2 Design experimental

Foram avaliados oito tratamentos, dispostos em delineamento de blocos casualizados em esquema fatorial 4×2 , com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais. Foram aplicadas quatro doses de fertilizante de sílica amorfa (FSA = 0,0; 300,0; 450,0 e 600,0 kg ha⁻¹), correspondentes a 0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente. E dois níveis de capacidade máxima de retenção de água no solo (CMRA = 40% e 80%).

O fertilizante Agrisilica® Granules (2 - 5mm), fonte de Si, foi fornecido na adubação de fundação da cana-de-açúcar, em ciclo anterior. Este fertilizante possui em sua composição 26% de Si solúvel, 0,07% de N, 0,02% de P, 0,08% de K, 0,09% de S, 1,4% de Ca, 1,1% de Mg, 1,3% de Fe, 219 mg kg⁻¹ de Mn, 4,9 mg kg⁻¹ de B, 22 mg kg⁻¹ de Cu, 18 mg kg⁻¹ de Zn e 2,1 mg kg⁻¹ de Mo. As doses do fertilizante silicatado foram baseadas recomendações do fabricante (cana-de-açúcar: aplicar 300 - 600 kg ha⁻¹) e em estudos de Camargo et al. (2014).

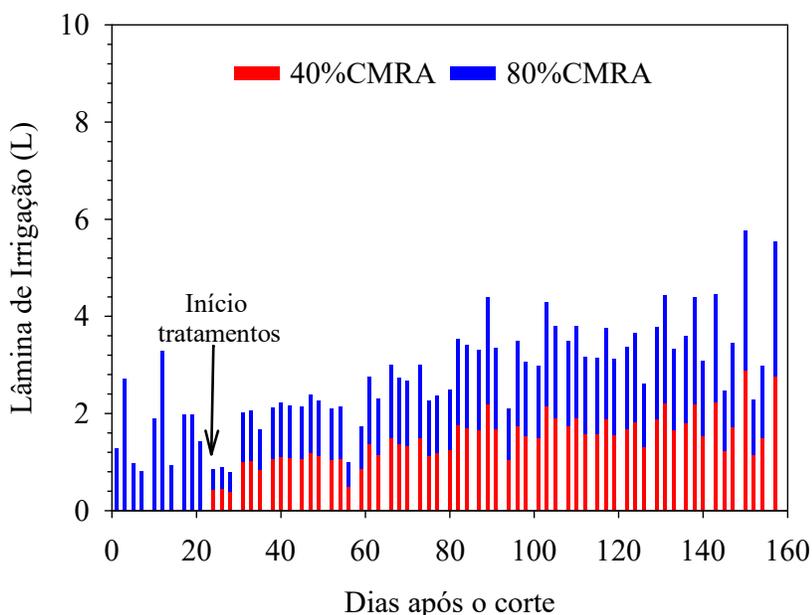
4.2.3 Manejo da hídrico

O turno de rega foi aplicado a cada dois dias, onde as umidades do solo foram controladas por um sistema de irrigação automatizado e utilizando-se como referência a média do balanço hídrico de três lisímetros de drenagem.

Para compensar as perdas por evapotranspiração e assegurar a drenagem nos lisímetros, adicionou-se 10% ao volume de irrigação aplicado. As lâminas utilizadas nos tratamentos corresponderam a 40% e 80% da CMRA dos lisímetros de drenagem, determinadas pela relação entre o volume evapotranspirado (V_e) referente a 100% da lâmina e a eficiência de aplicação da água ($E_a = 97,5\%$), resultando no volume bruto (V_b) de irrigação.

A aplicação diferenciada das lâminas de irrigação teve início aos 25 dias após o corte (DAC), após um período inicial de adaptação de 30 dias com irrigação a 100% da CMRA, aplicando-se as lâminas correspondentes aos tratamentos previamente descritos. Durante o experimento, as lâminas de irrigação referentes aos tratamentos de 40% e 80% da CMRA totalizaram 102,02 L ($0,65 \text{ L dia}^{-1}$) e 186,76 L ($1,19 \text{ L dia}^{-1}$), respectivamente (Figura 2).

Figura 2 – Lâmina de irrigação aplicada ao longo do período experimental de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



4.2.4 Avaliações na cana-soca

4.2.4.1 Fluorescência da clorofila

Aos 80, 110 e 140 DAC a fluorescência da clorofila foi avaliada no terço médio da folha +1, com um fluorômetro portátil (Modelo Fluorpen FP 100), onde a folha foi mantida no escuro com auxílio de cliques. As variáveis analisadas foram Fluorescência inicial (F_0), Fluorescência máxima (F_m), Fluorescência variável (F_v), eficiência quântica fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m).

4.2.4.2 Pigmentos fotossintéticos

Aos 150 DAC coletou-se fragmentos foliares no terço médio da lâmina foliar da folha +1, pesou-se 0,1g de amostras e em seguida embebidas em acetona a 80% (v/v). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 663,2 nm para clorofila a (Chl *a*), 646,8 nm para clorofila b (Chl *b*) e 470 nm para carotenoides (LICHTENTHALER, 1987).

4.2.4.3 Trocas gasosas foliares

Aos 80, 110 e 140 DAC os parâmetros de trocas gasosas foliares foram avaliados no terço médio da folha +1, evitando a nervura central, com um Analisador Portátil de Gás Infravermelho - IRGA, (modelo LICOR L - 6400 XT). Mediante a análise foi possível obter fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (G_s) e concentração interna de CO_2 (C_i), a eficiência instantânea de uso de água (EUA) foi calculada pela razão entre A e E . Calculou-se a eficiência instantânea de carboxilação (EIC) pela razão entre A e C_i .

4.2.5 Análise estatística

Os dados de fluorescência da clorofila, pigmentos fotossintéticos e trocas gasosas nas plantas foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade e análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($P \leq 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos para o fator dosagens de Si foram comparados mediante análise de regressão ($P \leq 0,05$). As análises foram realizadas utilizando o software STATÍSTICA versão 10.0 (STATSOFT. INC, 2010).

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Fluorescência da clorofila a

Na Tabela 2, pode-se observar que aos 80 dias após o corte (DAC), houve efeito significativo ($P \leq 0,01$) da interação entre a capacidade máxima de retenção de água (CMRA) e as doses de silício apenas na fluorescência inicial (Fo), conforme teste F. As CMRA (40% e 80%) e as doses promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) de forma isolada na fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv), eficiência quântica fotoquímica do fotossistema II (Fv/Fm). O mesmo comportamento foi observado aos 110 DAC. Aos 140 DAC, pode-se observar o efeito significativo ($P \leq 0,01$) da interação entre as CMRA e as doses para todas as variáveis de fluorescência da clorofila a avaliadas (Fo, Fm, Fv e Fv/Fm) pelo teste F.

Tabela 2 – Análise de variância para fluorescência inicial (Fo), fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv), eficiência quântica fotoquímica do fotossistema II (Fv/Fm) em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

80 DAC					
Quadrado médio					
Fonte de variação	GL	Fo	Fm	Fv	Fv/Fm
CMRA	1	20655,28**	483144,50**	703001,53**	0,0458**
Doses de Si	3	12837,86**	109904,42**	193838,53**	0,0180**
CMRA × Doses de Si	3	1830,95**	6710,58 ^{ns}	9730,61 ^{ns}	0,0024 ^{ns}
Blocos	3	969,61**	849,08 ^{ns}	1330,61 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
Resíduo	21	342,59	17835,39	20120,33	0,0014
CV	%	12,58	16,80	11,38	5,91
110 DAC					
Quadrado médio					
Fonte de variação	GL	Fo	Fm	Fv	Fv/Fm
CMRA	1	58055,28**	132999,03**	366796,13**	0,0442**
Doses de Si	3	80062,84**	270579,03**	458141,21**	0,0495**
CMRA × Doses de Si	3	14755,84**	7192,78 ^{ns}	2587,04 ^{ns}	0,0015 ^{ns}
Blocos	3	670,84 ^{ns}	7738,95 ^{ns}	5707,21 ^{ns}	0,0002 ^{ns}
Resíduo	21	4038,91	7461,97	7600,11	0,0005
CV	%	11,68	14,66	8,49	4,15
140 DAC					
Quadrado médio					
Fonte de variação	GL	Fo	Fm	Fv	Fv/Fm
CMRA	1	8064,50**	984555,28**	1170832,53**	0,0569**
Doses de Si	3	20262,13**	334430,86**	519020,36**	0,0364**
CMRA × Doses de Si	3	385,00**	10646,95**	13048,78**	0,0019**
Blocos	3	69,71 ^{ns}	737,61 ^{ns}	756,28 ^{ns}	0,0001 ^{ns}
Resíduo	21	51,38	1383,35	1588,13	0,0001
CV	%	10,96	11,87	13,21	1,68

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação; DAC – dias após o corte.

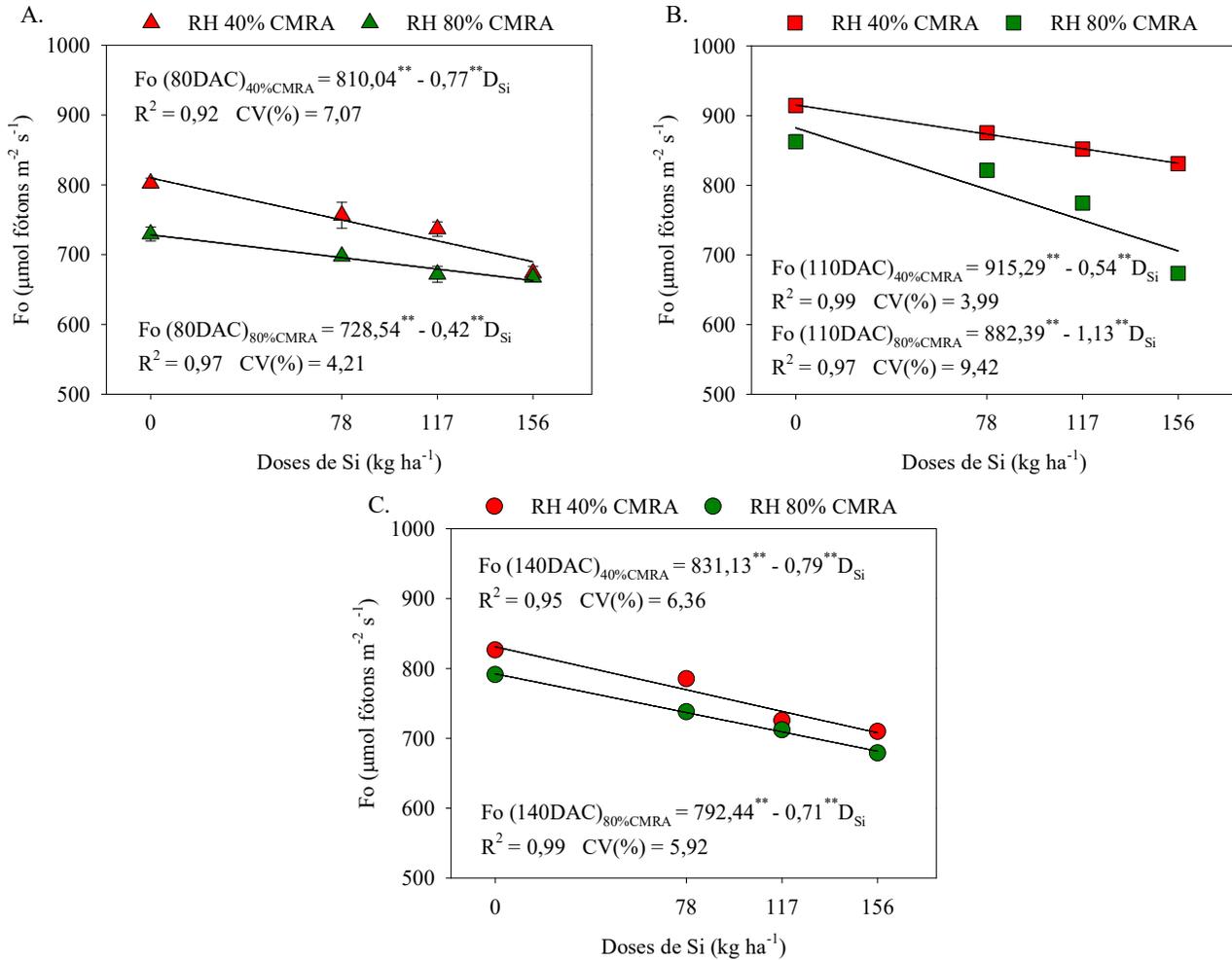
Aos 80 DAC, observou-se reduções na fluorescência inicial (Fo) sendo de $0,77 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $0,42 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas

40% (40% CMRA) e 80% da capacidade máxima de retenção de água (80% CMRA) (Figura 3A). Em 40% CMRA, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados para a F_o de 809,92 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 689,74 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (-14,84%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, e para 80% CMRA esses valores foram 728,54 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 662,80 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (-9,02%) para as respectivas doses.

Aos 110 DAC, observou-se reduções na F_o de 0,54 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 1,13 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses para 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 3B). Aos 140 DAC, observou-se reduções nos valores da F_o sendo de 0,79 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 0,71 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para cada incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 3C). As plantas de cana-soca submetidas a 40% CMRA apresentaram valores médios estimados para a F_o de 831,13 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 707,90 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (-14,83%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, enquanto em 80% CMRA esses valores foram 792,44 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 681,55 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (-13,99%) para as respectivas doses.

A F_o é a fluorescência quando a quinona receptora primária de elétrons do FSII está totalmente oxidada e o centro de reação do FSII está aberto, nesse momento ocorre à ativação das reações fotoquímicas (SILVA; PINCELLI; BARBOSA, 2018; TAIZ et al., 2017). Ainda de acordo com os autores, sob condições de estresse ambiental, como elevadas temperaturas e/ou déficit hídrico, o aumento de F_o reflete a degradação do centro de reação do FSII ou a diminuição na capacidade de transferência da energia de excitação do complexo antena para o centro de reação. No presente estudo, para ambas as condições de capacidade máxima de retenção de água, o aumento das doses reduziu os valores médios de F_o , indicando uma mitigação dos efeitos do estresse por deficiência hídrica no centro de reação do FSII.

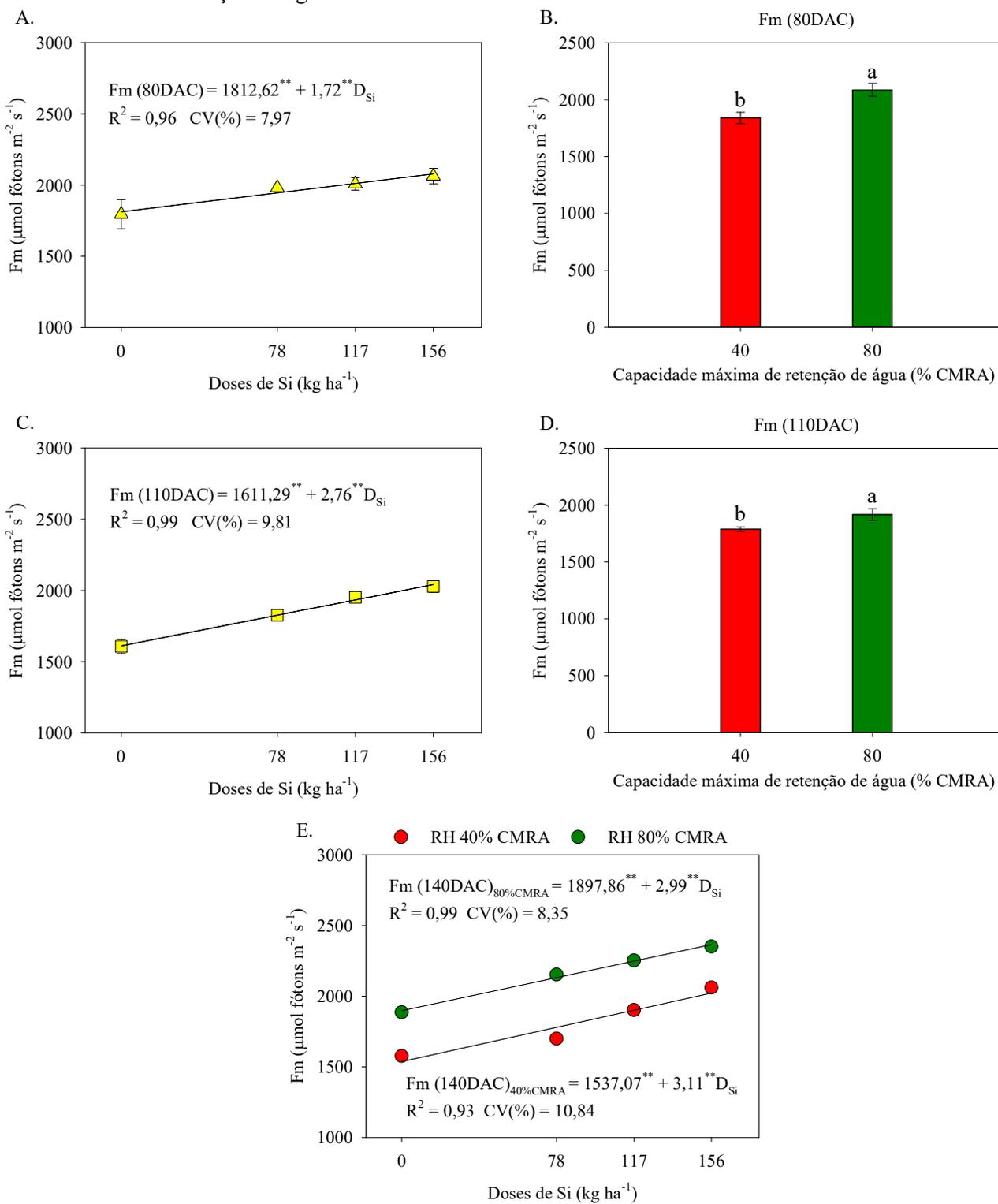
Figura 3 – Fluorescência inicial (A, B e C) aos 80, 110 e 140 dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$).

Os valores da fluorescência máxima (F_m) aumentaram $1,72 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 4A), aos 80 DAC. Os valores médios estimados da F_m nas folhas da cana-soca foram $1812,62 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $2080,94 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para as doses de 0 e 156kg ha^{-1} , respectivamente, representando um aumento de $14,80\%$. Para $40\% \text{CMRA}$ e $80\% \text{CMRA}$, a F_m foi $1840,63 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $2086,38 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($+13,35\%$), respectivamente (Figura 4B). Aos 110 DAC valores da F_m aumentaram $2,76 \mu\text{mol}$ de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 4C).

Figura 4 – Fluorescência máxima aos 80 (A e B), 110 (C e D) e 140 (E) dias após o corte em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} - doses de Si.

Os valores médios estimados da Fm nas folhas da cana-soca foram 1611,29 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 2041,85 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (+26,72) para as D_{Si} de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente. Em 40% CMRA e 80% CMRA, as folhas apresentaram valores da Fm de 1788,44 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 1917,38 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, um aumento percentual de 7,21 (Figura 4D).

Na data de 140 DAC, os valores da fluorescência máxima Fm aumentaram 3,11 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 2,99 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 4E). Os valores médios estimados da Fm nas folhas da cana-soca para 40% CMRA foram 831,13 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 707,90 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (-14,83%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, enquanto para 80% CMRA nas respectivas doses esses valores foram 1537,07 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 2022,50 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (+31,58%).

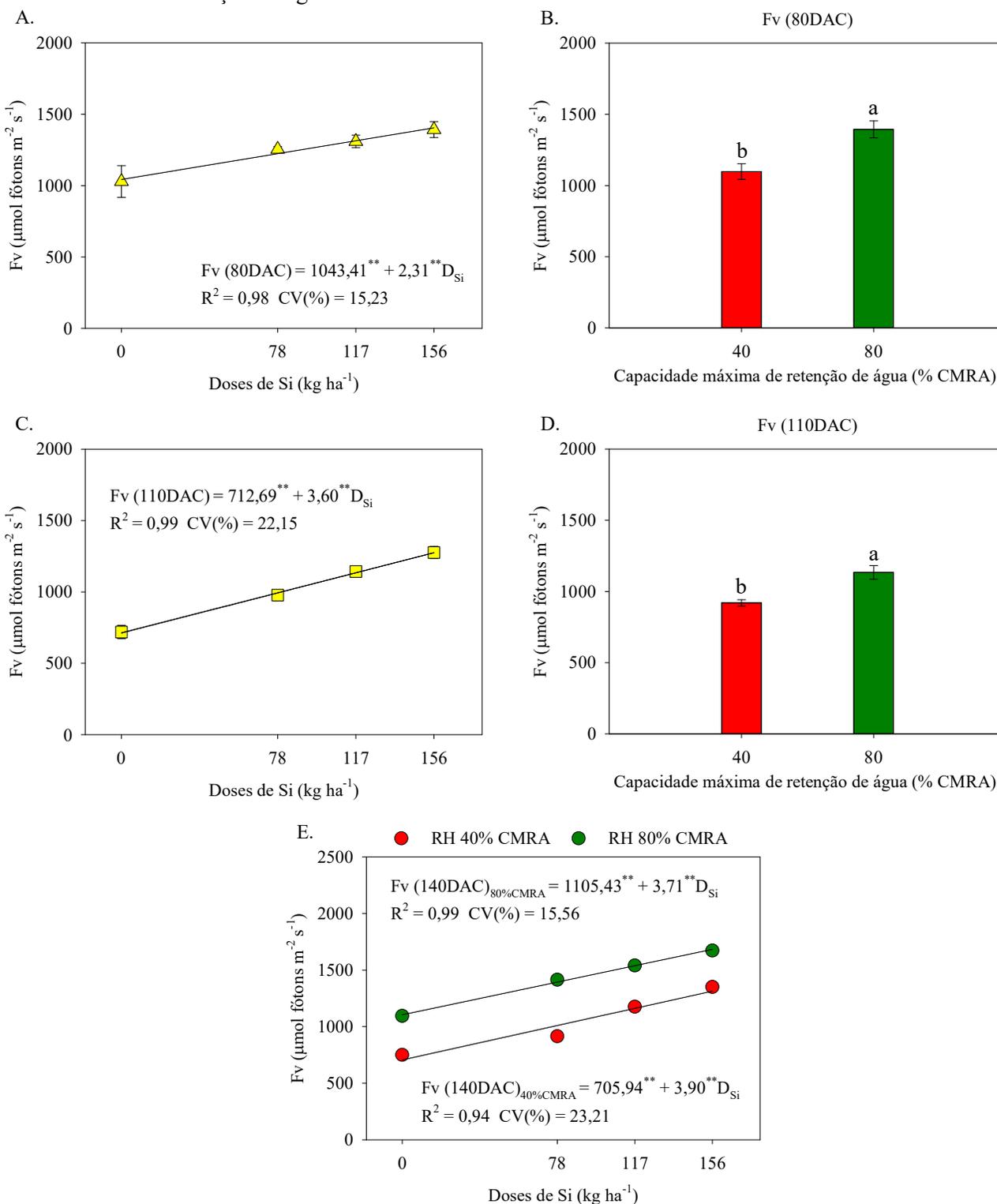
A Fm representa o valor máximo de fluorescência de clorofila, obtido para uma intensidade de luz contínua capaz de saturar a capacidade da planta de absorver elétrons, ocorre quando todos os centros de reação do FSII estão oxidados e adaptados ao escuro (SANTOS et al., 2014). Os valores de Fm obtidos no presente estudo foram superiores a 2000 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ na dose de 156 kg ha^{-1} e 80% CMRA indicando que essas condições favorecem a capacidade do FSII na absorção de elétrons.

Aos 80 DAC a fluorescência variável (Fv) apresentou aumento de 2,31 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 5A). Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} foram obtidos valores médios de Fv de 1043,41 e 1403,77 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (+34,54%), respectivamente. Em relação as capacidades de campo, foram obtidos valores da Fv de 1098,30 e 1394,81 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (+27,00%), respectivamente em 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 5B).

A Fv apresentou aumento de 3,60 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 5C), aos 110 DAC. As folhas da cana-soca submetidas as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} apresentaram valores médios da Fv de 712,69 e 1274,29 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente, um aumento percentual de 78,80. Para 40% CMRA e 80% CMRA foram obtidos valores da Fv de 920,25 e 1134,38 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (+23,27%), respectivamente (Figura 5D).

Para a data de 140 DAC a Fv obteve aumentos de 3,90 e 3,71 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 5E). Em 40% CMRA os valores médios estimados para a Fv foram 705,94 e 1314,60 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (+86,22%) nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, por sua vez em 80% CMRA esses valores foram 1105,43 e 1684,00 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (+52,34%) nas respectivas doses.

Figura 5 – Fluorescência variável aos 80 (A e B), 110 (C e D) e 140 (E) dias após o corte em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coeficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} - doses de Si.

A F_v é uma relação dependente dos valores de fluorescência máxima e basal, segundo Baker (2008) ela expressa a resposta mais importante da planta, em se tratando de fluorescência de folhas adaptadas ao escuro. Quanto maior a F_v maior a capacidade da planta em transferir a energia dos elétrons ejetados das moléculas dos pigmentos para a formação do redutor NADPH, ATP e ferredoxina reduzida e, conseqüentemente, maior a sua capacidade de assimilação do CO_2 na fase bioquímica da fotossíntese.

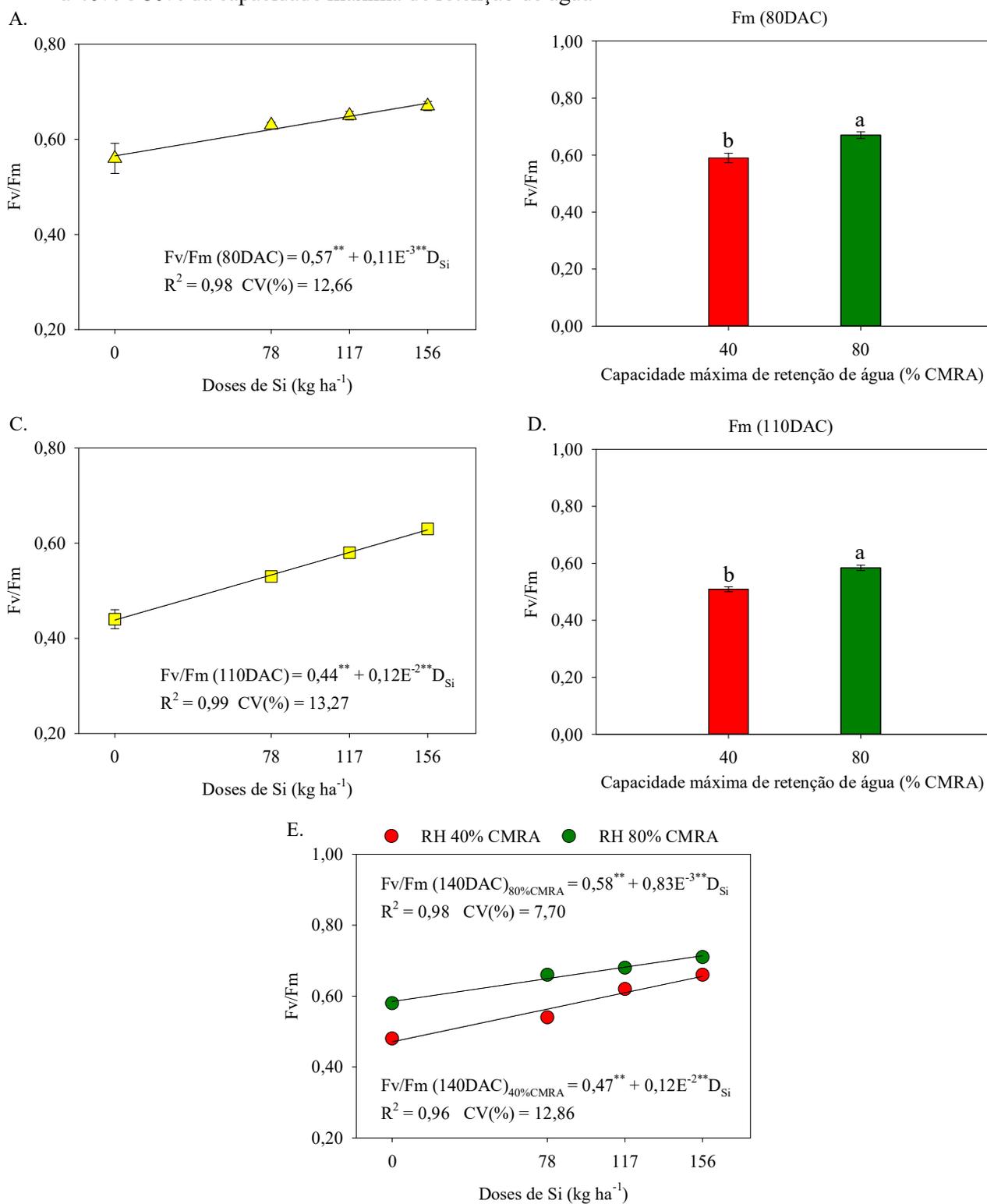
Estudos realizados por Santos et al. (2014) com quatro genótipos (698B, 712B, 260B e 3B) de cana-de-açúcar sob irrigação plena obtiveram valores variando de 1061,13 a 1345,48 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, corroborando com os achados da presente pesquisa com destaque aos tratamentos com maiores doses (78 a 156 kg ha^{-1}) e 80% CMRA, que apresentaram valores superiores a 1200 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ indicando maior capacidade das plantas de assimilação CO_2 na fase fotoquímica com reflexos significativos nas trocas gasosas, crescimento e produção de biomassa.

Aos 80 DAC eficiência quântica fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m) das folhas da cana-soca aumentou de 0,0007 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 6A). Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} observou-se valores estimados da F_v/F_m de 0,57 e 0,68, respectivamente, um aumento de 19,16%. Para 40% CMRA e 80% CMRA, as razões F_v/F_m foram 0,59 e 0,67 (+12,66%), respectivamente (Figura 6B).

A F_v/F_m aumentou de 0,0012 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 6C), aos 110 DAC. Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} observou-se valores estimados da F_v/F_m de 0,44 e 0,63 (+42,55%), respectivamente. Em 40% CMRA e 80% CMRA, as razões F_v/F_m foram 0,51 e 0,58 (+14,74%), respectivamente (Figura 6D).

Aos 140 DAC a F_v/F_m nas folhas da cana-soca apresentou aumentos de 0,0012 e 0,00083 μmol de fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 6E). Para a razão F_v/F_m da cana-soca submetida a 40% CMRA os valores estimados foram de 0,47 e 0,66 (+39,75%) nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, já em 80% CMRA os valores dessa razão foram 0,58 e 0,71 (+22,14%) nas respectivas doses.

Figura 6 – Eficiência quântica fotoquímica do fotossistema II aos 80 (A e B), 110 (C e D) e 140 (E) dias após o corte em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

A relação Fv/Fm representa a estimativa da eficiência quântica máxima da atividade fotoquímica do FSII (BAKER; ROSENQVST, 2004), e têm sido amplamente utilizadas em estudo de tolerância da cana-de-açúcar ao déficit hídrico (SANTOS et al., 2014; SILVA et al., 2012, SILVA; PINCELLI; BARBOSA, 2018) indicando que as variedades/genótipos de cana-de-açúcar com capacidade de manter o Fv/Fm > 0,75 podem ser consideradas tolerantes. Isso se deve ao fato de a água ser a maior doadora de elétrons ao fotossistema II por meio do processo de oxidação, desse modo, a redução do teor de água pode diminuir o potencial eletroquímico da ATP sintase e do fotossistema I, comprometendo a formação de ATP e NADPH, respectivamente, e afetando negativamente o aparato fotossintético (PIMENTEL, 2014; TAIZ et al., 2017).

Em estudo com 78 genótipos de cana-de-açúcar sob déficit hídrico moderado (80% CMRA), foi observada uma correlação 66% entre rendimento de massa seca e a Fv/Fm, com valor médio de 0,77 (SILVA et al., 2012). Avaliando resposta da variedade RB966928 sob déficit hídrico e aplicação de fertilizante silicatado via fertirrigação, Teixeira et al. (2022a) obtiveram valores médios da Fv/Fm na condição sem aplicação de Si de 0,59 (30% CC) e 0,68 (70% CC), com aplicação de Si de 0,68 (30% CC) e 0,72 (70% CC), corroborando com os achados do presente estudo, principalmente com os resultados obtidos aos 140 DAC.

4.3.2 Pigmentos fotossintéticos

Na Tabela 3, observa-se que houve efeito significativo ($P \leq 0,01$) da interação entre a capacidade máxima de retenção de água (CMRA) e as doses de silício nos teores foliares dos pigmentos fotossintéticos clorofila a (Chl *a*), clorofila b (Chl *b*), clorofila total (Chl *a+b*) e carotenoides em cana-soca conforme teste F.

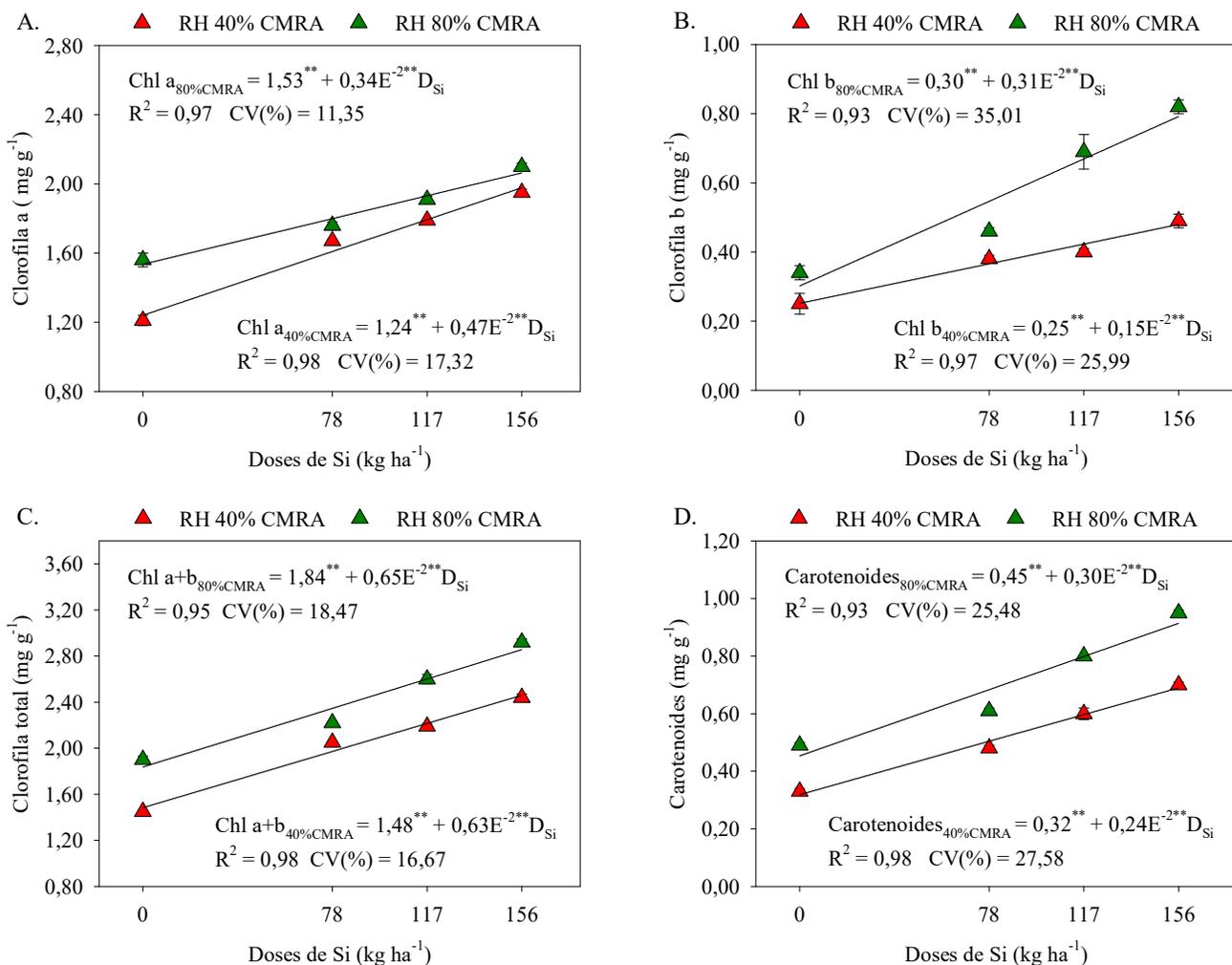
Tabela 3 – Análise de variância para clorofila a (Chl *a*), clorofila b (Chl *b*), clorofila total (Chl *a+b*) e carotenoides em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

Fonte de variação	GL	Quadrado médio			
		Chl <i>a</i>	Chl <i>b</i>	Chl <i>a+b</i>	Carotenoides
CMRA	1	0,2646**	0,3120**	1,1438**	0,2757**
Doses de Si	3	0,5868**	0,1978**	1,4537**	0,2612**
CMRA × Doses de Si	3	0,0294**	0,0364**	0,0420**	0,0054**
Blocos	3	0,0022 ^{ns}	0,0025 ^{ns}	0,0024 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
Resíduo	21	0,0017	0,22	0,0026	0,0005
CV	%	2,33	10,37	2,27	3,78

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e 0,05, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

As variáveis relacionadas aos pigmentos fotossintéticos clorofila a (Chl *a*), clorofila b (Chl *b*), clorofila total (Chl *a+b*) e carotenoides ajustaram-se a modelos lineares ($P \leq 0,05$) conforme Figura 7.

Figura 7 – Clorofila a (A), clorofila b (B), clorofila total (C) e carotenoides (D) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

Na Figura 7A, observou-se aumentos nos teores foliares de clorofila a (Chl *a*) de $0,0047 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,0034 \text{ mg g}^{-1}$ em cana-soca para cada incremento unitário das doses para 40% (40% CMRA) e 80% da capacidade máxima de retenção de água (80% CMRA), respectivamente. As folhas das plantas submetidas a 40% CMRA apresentaram teor médio estimado de Chl *a* de $1,97 \text{ mg g}^{-1}$ na dose de 156 kg ha^{-1} , representando um aumento de 59,14% em relação a menor

dose (0 kg ha^{-1}), enquanto em 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} o teor foi de $2,07 \text{ mg g}^{-1}$, aumento de 34,56% em relação a 0 kg ha^{-1} .

Nos teores foliares de clorofila b (Chl *b*) observou-se aumentos de $0,0015 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,0031 \text{ mg g}^{-1}$ de para cada incremento unitário das doses para as respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 7B). As plantas submetidas a 40% CMRA apresentaram valores médios de teores de Chl *b* de $0,49 \text{ mg g}^{-1}$ na dose de 156 kg ha^{-1} , aumento de 93,08% em relação a 0 kg ha^{-1} , enquanto em 80% CMRA apresentou teor médio de $0,79 \text{ mg g}^{-1}$ (156 kg ha^{-1}), aumento de 44,49% em relação a 0 kg ha^{-1} .

Os teores da clorofila total (Chl *a+b*) na cana-soca os aumentos foram de $0,0065 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,0063 \text{ mg g}^{-1}$ para cada incremento unitário das doses para 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 7C). Para 40% CMRA os valores médios estimados para a Chl *a+b* foram $1,48 \text{ mg g}^{-1}$ e $2,47 \text{ mg g}^{-1}$ (+66,28%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, enquanto em 80% CMRA para as respectivas doses esses valores foram $1,84 \text{ mg g}^{-1}$ e $2,85 \text{ mg g}^{-1}$ (+55,21%).

Os teores de carotenoides apresentaram aumentos de $0,0024 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,0030 \text{ mg g}^{-1}$ por incremento unitário de doses para 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 7D). Observou-se ainda valores médios de $0,32 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,69 \text{ mg g}^{-1}$ (+117,51%) nos carotenoides em plantas submetidas a 40% CMRA combinado com as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, já para 80% CMRA os teores médios foram de $0,69 \text{ mg g}^{-1}$ e $0,92 \text{ mg g}^{-1}$ (+103,22%) para as respectivas doses. A combinação de 80% CMRA com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 33,33% no teor de carotenoides nas folhas quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

As clorofilas a e b, e os carotenóides são pigmentos fotossintéticos com função de absorver energia luminosa atuando como complexo antena. Esses pigmentos estão diretamente associados ao centro de reação do fotossistema II, fornecendo energia para as reações bioquímicas de oxidação e redução (TAIZ et al., 2017).

O aumento da eficiência fotoquímica pode ser devido ao maior teor de Chl *a* (Figura 7A) e Chl *b* (Figura 7B), mantêm a atividade fotossintética e evitam a exposição dos cloroplastos em altos níveis de energia de excitação. O incremento nas doses também promoveu aumento dos teores foliares de carotenoides (Figura 7D), estes pigmentos são antioxidantes que diminuem a degradação de diferentes compostos orgânicos da planta, incluindo as clorofilas (HUSSAIN et al., 2021; MUSTAFA et al., 2021 TAIZ et al., 2017), assim, os resultados da presente pesquisa demonstram que o Si desempenha um papel importante na proteção e aumento dos pigmentos fotossintéticos nas plantas. Por tanto, favorece a absorção de luz pelos tecidos foliares, aumenta a atividade fotossintética e os teores de açúcares solúveis.

Em cana-de-açúcar (RB966928) sob déficit hídrico (30% e 70%CC) com adubação silicatada, Teixeira et al. (2022b) obtiveram teores médios de Chl *a* (2,4 e 3,0 mg g⁻¹), Chl *b* (0,6 e 0,8 mg g⁻¹), carotenoides (1,2 e 1,6 mg g⁻¹), respectivamente, corroborando com achados da presente pesquisa (Figura 7).

4.3.3 Trocas gasosas foliares

Aos 80 dias após o corte (DAC), houve efeito significativo ($P \leq 0,01$) da interação entre as capacidades máximas de retenção de água (CMRA) e as doses de silício nas variáveis das trocas gasosas (Tabela 4), sendo a fotossíntese líquida (A) e condutância estomática (Gs) pelo teste F, exceto para a transpiração foliar (E), na concentração interna de CO₂ (Ci) e eficiência instantânea no uso de água (EUA). As CMRA (40% e 80%) e as doses promoveram efeito significativo ($P \leq 0,05$) de forma isolada na E. Não houve efeito significativo ($P > 0,05$) dos tratamentos na concentração interna de CO₂ (Ci) e eficiência instantânea de uso de água (EUA).

Tabela 4 – Análise de variância para fotossíntese líquida (A), transpiração (E), condutância estomática (Gs), concentração interna de CO₂ (Ci), eficiência instantânea no uso de água (EUA), em cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

80 DAC						
Quadrado médio						
Fonte de variação	GL	A	E	Gs	Ci	EUA
CMRA	1	155,62**	4,73**	0,0045**	145,86 ^{ns}	1,84 ^{ns}
Doses de Si	3	27,39**	1,43**	0,0007**	117,78 ^{ns}	0,14 ^{ns}
CMRA × Doses de Si	3	19,45**	0,28 ^{ns}	0,0003**	1022,75 ^{ns}	0,56 ^{ns}
Blocos	3	0,78 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	3858,99 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Resíduo	21	13,07	0,22	0,0000	232,46	0,15
CV	%	6,35	11,84	11,41	79,58	12,30
110 DAC						
Quadrado médio						
Fonte de variação	GL	A	E	Gs	Ci	EUA
CMRA	1	34,05**	6,45**	0,0013**	14285,15*	0,0253 ^{ns}
Doses de Si	3	10,79**	6,62**	0,0014**	4876,13 ^{ns}	0,0889**
CMRA × Doses de Si	3	0,89*	0,17**	0,0001 ^{ns}	1609,03**	0,2695 ^{ns}
Blocos	3	0,33 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,0000 ^{ns}	81,34 ^{ns}	0,0088 ^{ns}
Resíduo	21	0,23	0,02	0,0000	112,08	0,0495
CV	%	6,56	4,52	12,47	11,90	9,18
140 DAC						
Quadrado médio						
Fonte de variação	GL	A	E	Gs	Ci	EUA
CMRA	1	121,99**	13,70**	0,0018**	8621,48**	0,13 ^{ns}
Doses de Si	3	189,85**	34,48**	0,0028**	4333,34**	1,88**
CMRA × Doses de Si	3	8,25**	0,62**	0,0001*	39,50**	0,07 ^{ns}
Blocos	3	0,14 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,0000 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Resíduo	21	0,22	0,06	0,0000	4,44	0,04
CV	%	12,07	3,93	2,56	12,70	5,48

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

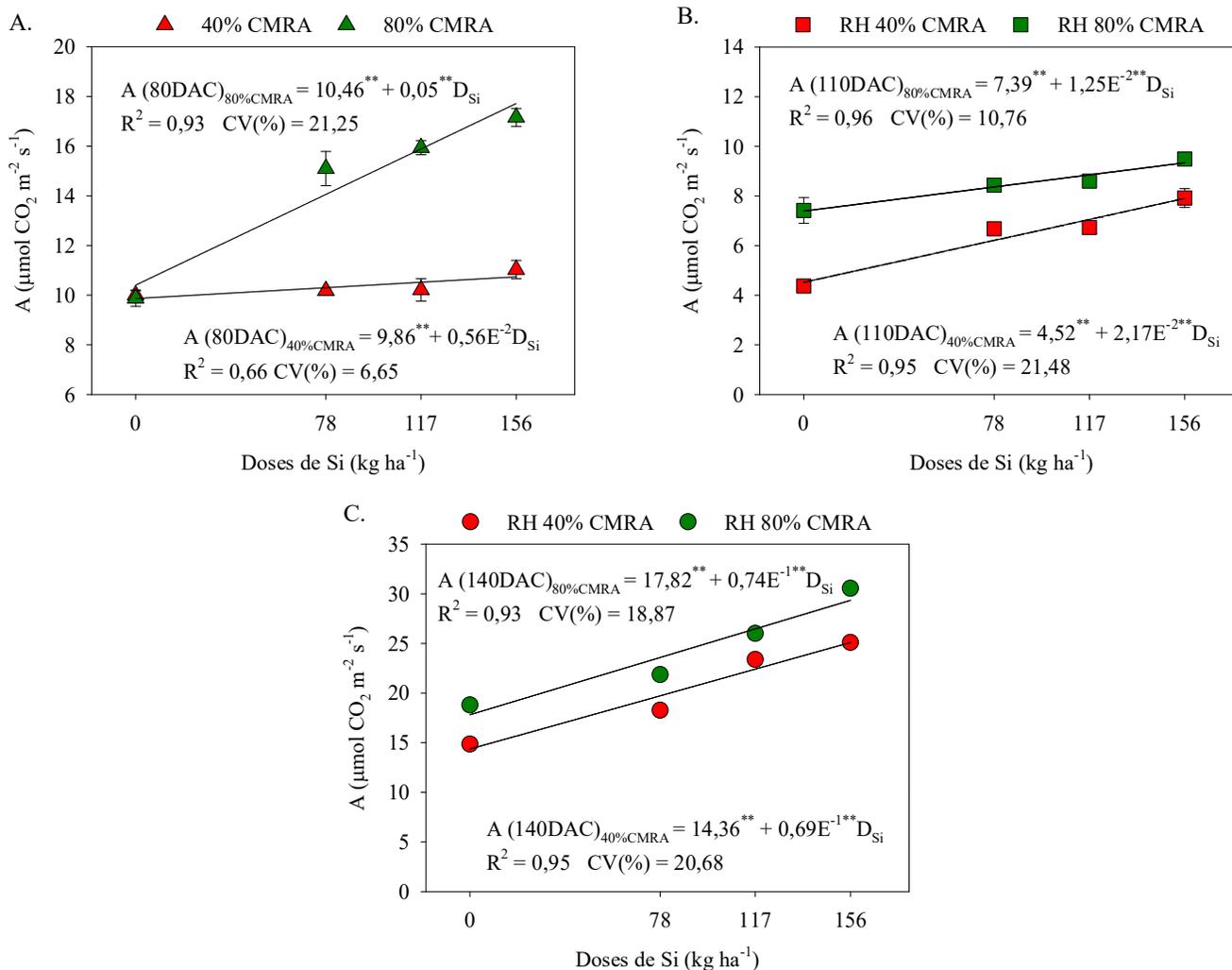
Aos 110 DAC, houve efeito significativo ($P \leq 0,05$) da interação entre as CMRA e as doses nas variáveis A, E e Ci. De forma isolada, as CMRA e as doses promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) na Gs. As doses promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) de forma isolada na EUA. Aos 140 DAC, pode-se observar o efeito significativo ($P \leq 0,05$) da interação entre as CMRA e as doses nas variáveis A, E, Gs e Ci. Assim como aos 110 DAC, as doses promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) de forma isolada na EUA, conforme Tabela 4.

Aos 80 dias após o corte (DAC), observou-se aumentos na fotossíntese líquida (A) sendo de $0,0056 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário das doses em 40% (40% CMRA) e 80% da capacidade máxima de retenção de água (80% CMRA), respectivamente (Figura 8A). Para 40% CMRA, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados para a fotossíntese líquida de $9,86 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $10,73 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+8,86%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, e em 80% CMRA esses valores de A foram $10,46 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $18,26 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+74,87%) para as respectivas doses. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 70,26% na A das plantas da cana-soca quando a 40% CMRA na mesma dose.

Aos 110 DAC, observou-se aumentos na A sendo de $0,0217 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,0125 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 8B). Para 40% CMRA, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados para a A de $4,52 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $7,91 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+74,87%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, e em 80% CMRA esses valores de A foram $7,39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $9,34 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+26,37%) para as respectivas doses. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 18,08% na A das plantas da cana-soca quando comparada a 40% CMRA na mesma dose.

Observou-se aumentos na A sendo de $0,069 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,074 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 8C), aos 140 DAC. Em 40% CMRA, as folhas das plantas apresentaram valores médios estimados para a A de $14,36 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $25,10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+74,73%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, e para 80% CMRA esses valores de A foram $17,82 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $29,35 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+64,68%) para as respectivas doses. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 16,93% na A das plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Figura 8 – Fotossíntese líquida - A aos 80 (A), 110 (B) e 140 (C) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

Baseado em uma compilação de resultados de diversos autores, Larcher (2004) destaca que a fotossíntese líquida em gramíneas C4 sob radiação fotossinteticamente ativa (PAR) de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e condições edafoclimáticas ótimas, varia de 30 a $60 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$. No presente estudo, os valores encontraram-se bem inferiores variando de $4,52$ a $25,10$ (40% CMRA) e de $7,39 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $29,35 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (80% CMRA), sendo as variações em função das doses. No entanto, cabe destacar que além do déficit hídrico, observou-se elevadas temperaturas máximas no interior da casa de vegetação (Figura 1), além disso, a PAR estiveram abaixo de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante a realização das três leituras devido à nebulosidade e da cobertura plástica da casa de vegetação.

Portanto, as taxas fotossintéticas do presente estudo corroboram com os achados de Teixeira et al. (2022b), os autores obtiveram A média de $9 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $11 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em cana-de-açúcar sem e com adubação silicatada, respectivamente, no regime hídrico de 30%CC, e média de $14 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ no 70%CC. Ainda de acordo com os autores, o declínio da atividade fotossintética em decorrência do déficit hídrico, se dá paralelamente à diminuição do volume celular associado, principalmente a redução na turgescência.

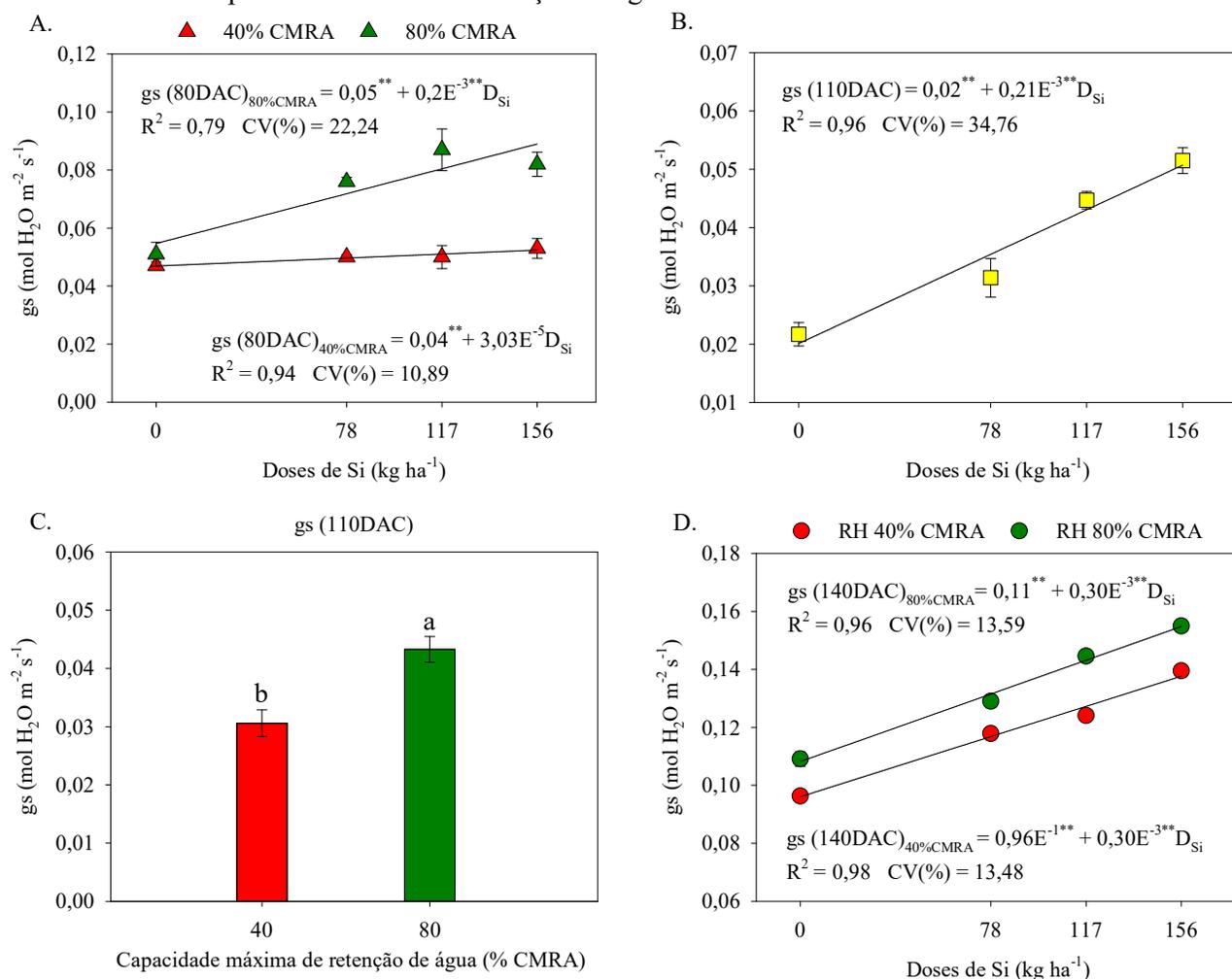
Na Figura 9A aos 80 DAC, observou-se que condutância estomática (gs) em 40% CMRA apresentou valores médios estimados de $0,040 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,045 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+11,82%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, e para 80% CMRA esses valores de gs foram $0,050 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,081 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+62,40%) para as respectivas doses. Em média, 80% CMRA combinado com a doses de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 80,00% na gs das plantas da cana-soca quando comparada a 40% CMRA na mesma dose.

Aos 110 DAC a gs aumentou de $0,0002 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 9B). Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} os valores médios estimados da gs foram de $0,0217 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,0515 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+136,80), respectivamente. Para 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 9C) os valores médios obtidos $0,0306 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,0433 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, representando um aumento de 41,66%.

Na data de 140 DAC a gs obteve aumentos de $0,0003 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,0003 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 9D). Para 40% CMRA, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados de gs de $0,096 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,143 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+48,75%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, já considerando em 80% CMRA esses valores foram $0,108 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,155 \text{ mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+43,25%) para as respectivas doses.

O aumento da gs sugere que o Si contribui para a manutenção da abertura estomática sob estresse hídrico, melhorando a fixação de CO_2 e a eficiência fotossintética (TEIXEIRA et al., 2022a).

Figura 9 – Condutância estomática (gs) aos 80 (A), 110 (B e C) e 140 (D) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



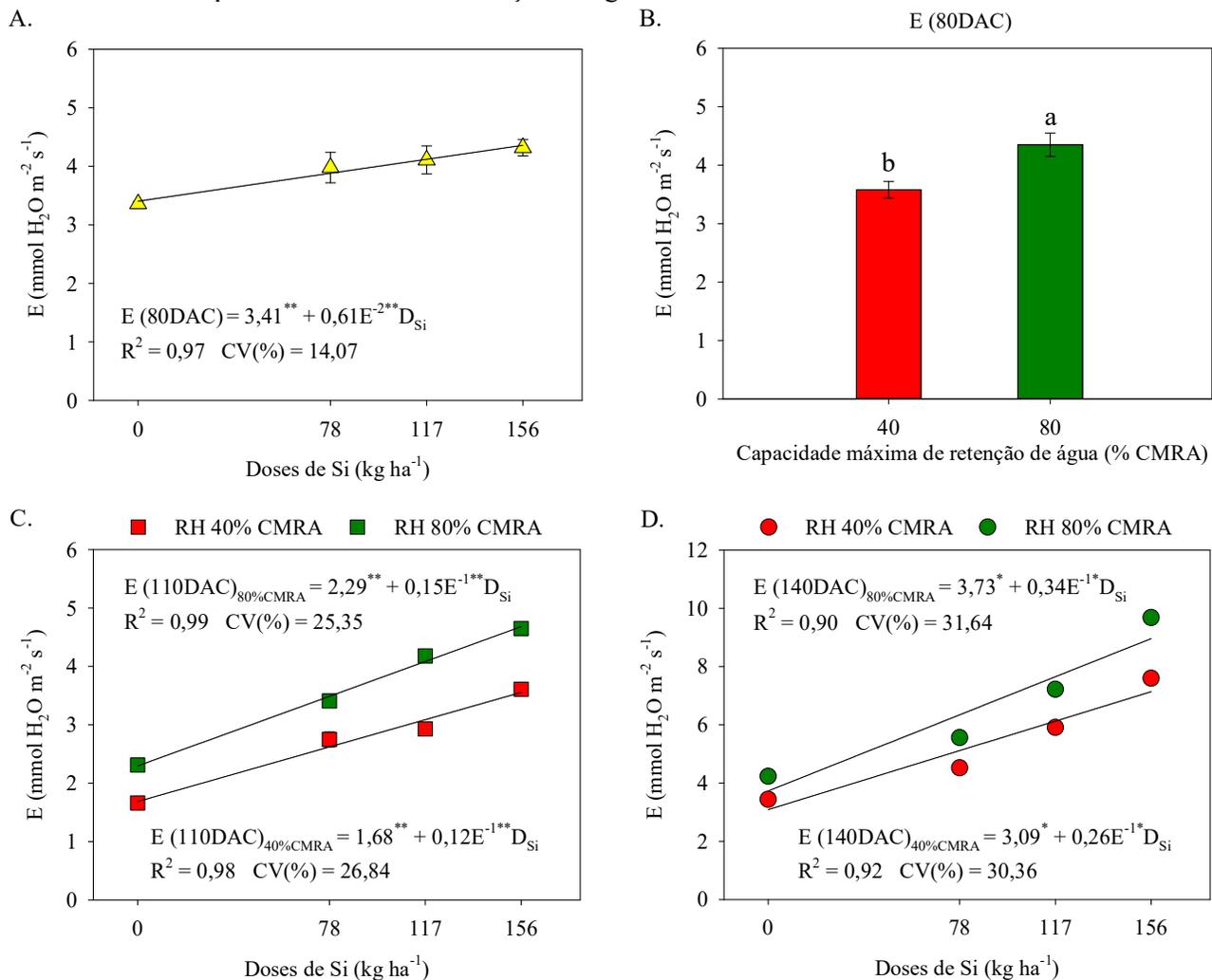
Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média (n = 4). D_{Si} – doses de Si.

Na data de 80 DAC observou-se que a taxa de transpiração foliar (E) apresentou aumentos de $0,0061 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário das doses. Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} foram obtidos valores médios de E de $3,41 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $3,61 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+27,91%), respectivamente (Figura 10A). Em relação as capacidades de campo, foram obtidos valores de E de $3,58 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $4,57 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+27,83%), respectivamente em 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 10B).

Aos 110 DAC a E apresentou aumentos de $0,012 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $0,015 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 10C). As folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados para a E em 40% CMRA de $1,68 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $3,55 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+111,43%) para as doses de

0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto para 80% CMRA esses valores foram 2,29 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ e 4,63 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ (+102,18%) para as respectivas doses. Em média, para 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha⁻¹ promoveu um aumento de 30,42% na E das plantas da cana-soca quando ao compara a 40% CMRA na mesma dose.

Figura 10 – Transpiração foliar (E) aos 80 (A e B), 110 (C) e 140 (D) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} - doses de Si.

A transpiração (E) apresentou aumentos de 0,026 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ e 0,034 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 10D), aos 140 DAC. Os valores médios estimados para a E em 40% CMRA de 3,09 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ e 7,14 mmol H₂O m⁻² s⁻¹ (+131,32%) para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente,

enquanto para 80% CMRA esses valores foram $3,73 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e $8,95 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (+140,15%) para as respectivas doses. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 25,35% na E das plantas da cana-soca quando comparada a 40% CMRA na mesma dose.

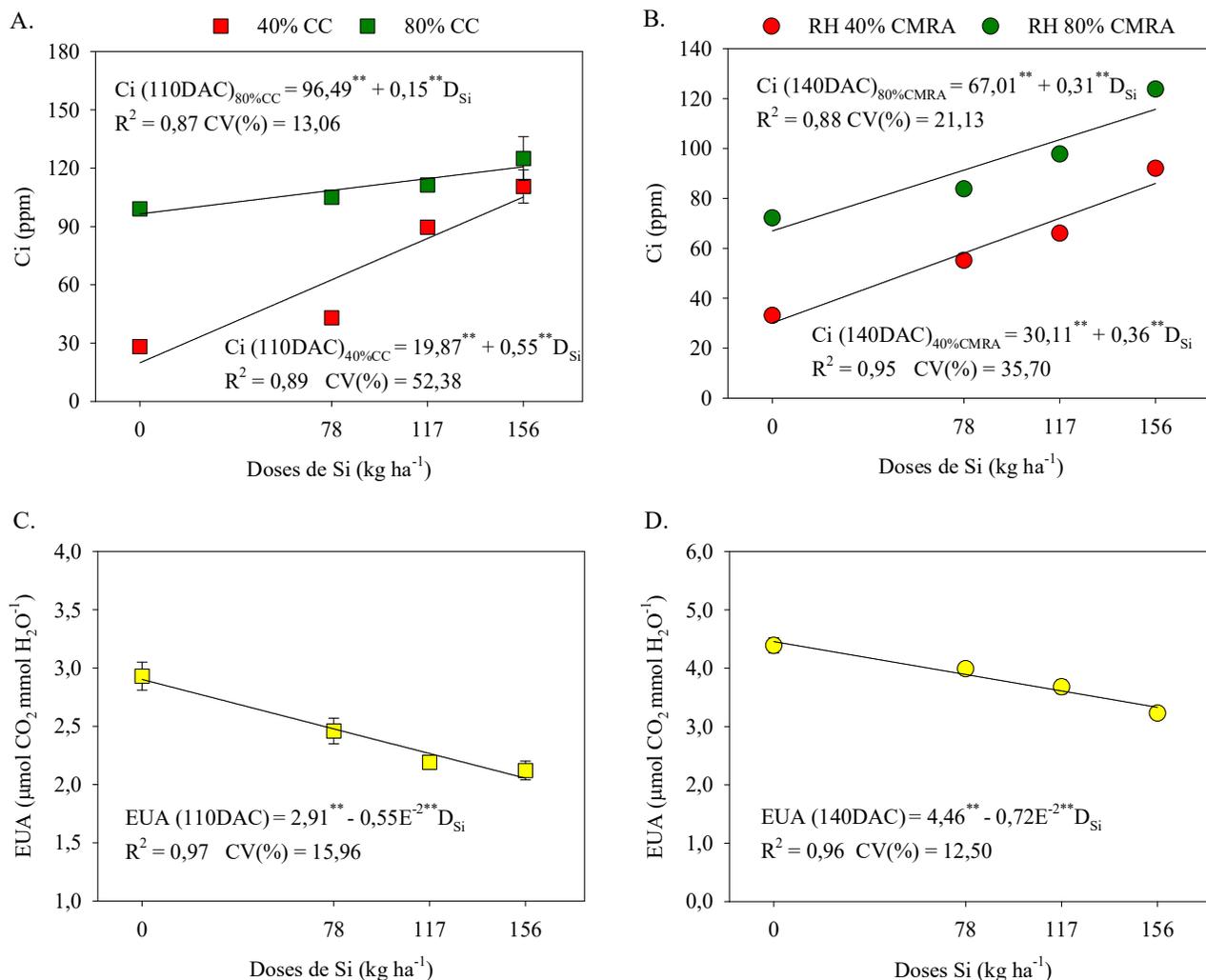
De acordo com Taiz et al. (2017) e Silva et al. (2018), plantas sob déficit hídrico severo reduzem a taxa de A, E, gs e Ci, no entanto, isso não se dá apenas devido as limitações estomáticas, mas associada a um conjunto de processos que desencadeiam à diminuição da turgescência foliar, degradação dos pigmentos fotossintéticos, ineficiência fotoquímica, diminuição da atividade enzimática (PEPcase e Rubisco) e desbalanço nutricional. Os estudos realizados por Teixeira et al. (2022a e 2022b) destacam que esses efeitos são mais danosos as plantas de cana-de-açúcar durante a formação inicial do colmo.

Na data (110 DAC), observou-se aumentos na concentração interna de CO_2 (Ci) sendo estes de 0,55 ppm e 0,15 ppm por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 11A). Para 40% CMRA, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados da Ci de 19,87 ppm e 105,67 ppm (+431,81%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, e em 80% CMRA esses valores foram 96,49 ppm e 119,89 ppm (+24,25%) para as respectivas doses.

Aos 140 DAC, a Ci apresentou aumentos na sendo estes de 0,36 ppm e 0,31 ppm por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 11B). Para 40% CMRA, as folhas das plantas de cana-soca apresentaram valores médios estimados da Ci de 30,11 ppm e 86,05 ppm (+135,81%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, enquanto em 80% CMRA esses valores foram 67,01 ppm e 115,70 ppm (+72,66%) para as respectivas doses. Em 80% CMRA combinado com a doses de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento médio de 34,46% na Ci das folhas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Aos 110 DAC eficiência instantânea de uso de água (EUA) reduziu de $0,0055 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ por incremento unitário das doses. Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} foram obtidos valores médios de EUA de $2,93 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ e $2,12 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$, respectivamente (Figura 11C), sendo está uma redução de -27,55%. Na Figura 9D, observou-se que a EUA reduziu de $0,0072 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ por incremento unitário das doses, aos 140 DAC. Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} foram obtidos valores médios de EUA de $4,39 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$ e $3,23 \text{ } \mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$, respectivamente, sendo uma redução de -26,50%.

Figura 11 – Concentração interna de CO₂ (Ci) aos 110 (A) e 140 (B) e eficiência instantânea de uso de água (EUA) aos 110 (C) e 140 (D) dias após o corte, respectivamente, em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

4.4 Conclusões

A principal hipótese desta pesquisa foi confirmada, uma vez que se observou que o efeito residual de doses de Si mitigou os efeitos do estresse hídrico em cana-soca, possibilitando uma maior eficiência fotoquímica devido aos incrementos nos teores dos pigmentos fotossintéticos das clorofilas a e b, e carotenoides. Além disso, ocorreram melhorias nas trocas gasosas com aumentos na fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração foliar e concentração interna de CO₂. Este resultado é importante pois confirma que o Si aplicado em fundação no cultivo de cana planta possibilita resultados benéficos na cana-soca sem reaplicação do Si. Esses achados fornecem suporte técnicos para o desenvolvimento de

estratégias de manejo sustentável da cana-de-açúcar em regiões semiáridas, permitindo maior produtividade mesmo em condições de estresse hídrico.

Referências Bibliográficas

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen'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>
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas of irrigation: water use in irrigated agriculture**. 2ª ed. 2023. <<https://www.gov.br/ana/>>. Accessed 21 Jan de 2025.
- BAKER, B. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 89-113, 2008. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- BAKER, N. R.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: An examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany, Oxford**, v. 55, n. 403, p. 1607–1621, 2004. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz535>
- BEZERRA, B. K. L.; LIMA, G. P. P.; REIS, A. R.; SILVA, M. A.; CAMARGO, M. S. Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>
- CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81-91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>
- CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, v. 13, p. 3691-3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, v. 167, p. 64–75, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>
- CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2.ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco, 2008. 198p.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.12 - safra 2024/2025 - Terceiro levantamento. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 26 janeiro 2025.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193p. **Irrigation and Drainage** (Paper 33).
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, p. 11–17, 1994.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Food and Agriculture - Statistical pocketbook** 2019. Rome. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ca6463en/ca6463en.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2023.

FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L.. **Scientia Horticulturae**, v. 123, p. 521–530, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.10.013>

GOU, T.; YANG, L.; HU, W.; CHEN, X.; ZHU, Y.; GUO, J.; GONG, H. Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 152, p. 53–61, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.031>

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The Water-culture Method for Growing Plants Without Soil**. California: University of California, p. 32, 1950.

HUSSAIN, H. A.; HUSSAIN, S.; KHALIQ, A.; ASHRAF, U.; ANJUM, S. A.; MEN, S.; WANG, L. Chilling and drought stresses in crop plants: implications, cross talk, and potential management opportunities. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 393, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00393>

HUSSAIN, S.; MUMTAZ, M.; MANZOOR, S.; SHUXIAN, L.; AHMED, I.; SKALICKY, M.; BRESTIC, M.; RASTOGI, A.; ULHASSAN, Z.; SHAFIQ, I.; ALLAKHVERDIEV, S. I.; KHURSHID, H.; YANG, W.; LIU, W. Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 159, p. 43–52, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.053>

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, p. 185–202, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.023>

KATZ, O.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; PRAKASH, N. B.; SCHALLER, J. Silicon in the soil–plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants**, v. 10, p. 652, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>

KIM, Y.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; LEE, J. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1–7, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00510>

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2004. 531p.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: **Methods in enzymology**. Academic Press, p. 350–382, 1987.

MOSTOFA, M. G.; RAHMAN, M.; ANSARY, M. U.; KEYA, S. S.; ABDELRAHMAN, M.; MIAH, G.; TRAN, L. P. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 41, p. 918–934, 2021. <https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582>

MUSTAFA, T.; SATTAR, A.; SHER, A.; UL-ALLAH, S.; IJAZ, M.; IRFAN, M.; BUTT, M.; CHEEMA, M. Exogenous application of silicon improves the performance of wheat under terminal heat stress by triggering physio-biochemical mechanisms. **Scientific Reports**, v. 11, p. 23170, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02594-4>

PRONASOLOS. Programa Nacional de Solos do Brasil. Solos do Brasil. Disponível: <<http://pronasolos.agenciazetta.ufla.br/solos-do-brasil>>. Acesso em: 28/07/2024.

OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; MELLO PRADO, R.; TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; SOUZA JUNIOR, J. P.; PICCOLO, M. C.; ROCHA, J. R. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N:P stoichiometry and its use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 255, p. 107006, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>

OLIVEIRA, R. A.; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Curitiba: UFPR, **RIDESA**, 2021. 79p.
PIMENTEL, C. Photoinhibition in a C4 plant, *Zea mays* L.: a minireview. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 157–165, 2014. <https://dx.doi.org/10.1007/s40626-014-0015-1>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, p. 532, 2018.

SANTOS, J. R.; OLIVEIRA JUNIOR, L. F. G.; SOUSA, J. P. S.; SILVA JUNIOR, C. D.; SARMENTO, C. R. Desempenho de genótipos promissores de cana-de-açúcar utilizando ferramentas fisiológicas e biométricas. **Bioscience Journal**, v. 30, p. 380–389, 2014.

SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G.; SANTOS, C. M.; SHARMA, V. Relationships between physiological traits and productivity of sugarcane in response to water deficit. **Journal of Agricultural Science**, v.152, p.104–118, 2012. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000834>

SILVA, M. A.; PINCELLI, R. P.; BARBOSA, A. M. Water stress effects on chlorophyll fluorescence and chlorophyll content in sugarcane cultivars with contrasting tolerance. **Bioscience Journal**, v. 34, n. 1, p. 75-87, 2018. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n1a2018-36570>

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 13.ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, p.410, 2022.

SONG, A.; LI, P.; FAN, F.; LI, Z.; LIANG, Y. The effect of silicon on photosynthesis and expression of its relevant genes in rice (*Oryza sativa* L.) under high-zinc stress. **PLOS ONE**, v. 11, p. 1-21, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113782>

STATSOFT. INC. Statistica: data analysis software system, version 10.0. 2010.

SUDENE. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do Semiárido – 2021: Relatório final**. Pernambuco: Recife, 2021. 272p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; OLIVEIRA, K. S.; D'AMICO-DAMIÃO, V.; SOUSA JUNIOR, G. S. Silicon increases leaf chlorophyll content and iron nutritional efficiency and reduces iron deficiency in sorghum plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, p. 1311–1320, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00214-0>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; SOUSA JÚNIOR, G. S.; GRATÃO, P. L. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports**, v. 12, p. 17487, 2022a. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. C. Silicon as a sustainable option to increase biomass with less water by inducing carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometric homeostasis in sugarcane and energy cane. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1-18, 2022b. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>

VERMA, K. K.; SINGH, R. K.; SONG, Q.; SINGH, P.; ZHANG, B.; SONG, X.; CHEN, G.; LI, Y. R. Silicon alleviates drought stress of sugarcane plants by improving antioxidant responses. **Biomedical Journal of Scientific & Technical**, v. 17, n. 1, p. ID. 00295712580-12586, 2019. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.17.002957>

VERMA, K.K.; SONG, X.P.; ZENG, Y.; GUO, D.J.; SINGH, M.; RAJPUT, V. D.; MALVIYA, M. K.; WEI, K. J.; SHARMA, A.; LI, D. P.; CHEN, G. L.; LI, Y. R. Foliar application of silicon boosts growth, photosynthetic leaf gas exchange, antioxidative response and resistance to limited water irrigation in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 582-592, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.032>

XIE, Z.; SONG, F.; XU, H.; SHAO, H.; SONG, R. Effects of Silicon on Photosynthetic Characteristics of Maize (*Zea mays* L.) on Alluvial Soil. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 1-6, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/718716>

ZHANG, Y.; SHI, Y.; GONG, H.; ZHAO, H.; LI, H.; HU, Y.; WANG, Y. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 17, p. 2151–2159, 2018. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62038-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62038-6)

5 CAPÍTULO IV: EFEITO RESIDUAL DE FERTILIZAÇÃO SILICATADA EM CANA-SOCA SOB DÉFICIT HÍDRICO: BIOMASSA, NUTRIÇÃO E RAZÕES ESTEQUIOMÉTRICAS DE NUTRIENTES

Resumo

O silício (Si) tem demonstrado efeitos benéficos em termos de tolerância a estresses abióticos como seca em diversas culturas. Entretanto, o efeito a prazo de uma aplicação via solo ainda é pouco pesquisado. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a produção de massa seca, aspectos nutricionais, razões estequiométricas C:N:P:Si e teores de Si no solo em cana-soca sob déficit hídrico e efeito residual de um fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA). As plantas de cana-soca foram submetidas a duas capacidades máximas de retenção de água (40% e 80% CMRA) e o efeito residual de quatro doses de FSA, correspondentes a 0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹ de Si, aplicadas em ciclo anterior. Foram avaliadas a produção de massa seca, teores foliares e extração de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), C orgânico e Si, razões estequiométricas C:N:P:Si e teores de Si no solo. O regime hídrico de 80% CMRA combinado com a dose residual de 156 kg ha⁻¹ promoveu aumento na massa seca das folhas (+34%) e massa seca do colmo (+78%) em comparação à 40% CMRA. Os teores foliares de Si foram 2,47 e 6,64 g.kg⁻¹ para as doses 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente. A dose de 156 kg ha⁻¹ combinada com 40% CMRA promoveu aumento nos teores de N (+27%), P (+84%) comparada a dose de 0 kg ha⁻¹. Os menores teores de Si no solo foram observados na camada de 15-30 cm com valores médios de 9,76 e 10,22 mg.dm⁻³ em 40% e 80% CMRA, respectivamente. Concluiu-se que o efeito residual das doses de Si promoveu aumentos significativos na massa seca, teores nutricionais nas folhas da cana-soca sob efeito residual de doses crescentes de Si. A ordem de extração e exportação de macronutrientes e Si pela variedade RB041443 foi: K > N > Si > Ca > P > Mg.

Palavras-chave: Estresse abiótico. Nutrição de plantas. Relação C:N:P. *Saccharum officinarum* L.. Sílica amorfa.

CAPÍTULO IV: RESIDUAL EFFECT OF SILICATE FERTILIZATION ON RATOON SUGARCANE UNDER WATER DEFICIT: BIOMASS, NUTRITION, AND NUTRIENT STOICHIOMETRIC RATIOS

Abstract

Silicon (Si) has shown beneficial effects on tolerance to abiotic stresses, such as drought, in various crops. However, the long-term effects of soil-applied silicon remain underexplored. In this context, this study aimed to evaluate dry mass production, nutritional aspects, C:N:P:Si stoichiometric ratios, and soil Si levels in ratoon sugarcane under water deficit and the residual effect of a fertilizer derived from amorphous silica (FSA). Ratoon sugarcane plants were subjected to two maximum water retention capacities (40% and 80% MWRC) and the residual effect of four rates of ASF, corresponding to 0.0, 78.0, 117.0, and 156.0 kg ha⁻¹ of Si, applied in the previous cycle. Evaluations included dry mass production, foliar concentrations, and macronutrient extraction (N, P, K, Ca and Mg), organic C e Si and Si, C:N:P:Si stoichiometric ratios, and soil Si levels. The 80% MWRC regime combined with the residual rate of 156 kg ha⁻¹ increased leaf dry mass (+34%) and stalk dry mass (+78 %) compared to 40% MWRC. Foliar Si concentrations were 2.47 and 6.64 g.kg⁻¹ for the 0 and 156 kg ha⁻¹ rates, respectively. The 156 kg ha⁻¹ rate combined with 40% MWRC increased N (+27%) and P (+84.60%) concentrations compared to the 0 kg ha⁻¹ rate. The lowest soil Si levels were observed in the 15-30 cm layer, with mean values of 9.76 and 10.22 mg.dm⁻³ at 40% and 80% MWRC, respectively. It was concluded that the residual effect of Si rates significantly increased dry mass and foliar nutrient concentrations in ratoon sugarcane under the residual effect of increasing Si rates. The order of macronutrient and Si extraction and exportation by the RB041443 variety was: K > N > Si > Ca > P > Mg.

Keywords: Abiotic stress. C:N:P ratio. Plant nutrition. *Saccharum officinarum* L.. Amorphous silica.

5.1 Introdução

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante no solo, sendo que a forma dióxido de silício (SiO_2) compreende 50-70% da massa do solo (EPSTEIN, 1994; HAYNES 2014; 2017), embora na solução do solo encontra-se disponível para as plantas como ácido monossilícico (H_4SiO_4) em baixas concentrações ($\sim 1 \text{ mmol L}^{-1}$ ou $28,09 \text{ mg dm}^{-3}$) de acordo com Katz et al. (2021), porque a solubilidade do Si é influenciada por características químicas, físicas e mineralógicas inerentes a cada solo (CAMARGO; KEEPING, 2021). Embora o Si não seja classificado como um elemento essencial para o crescimento pelos critérios de Arnon e Stout, a maioria das plantas (EPSTEIN, 2009), a Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO, 2014) e o International Plant Nutrition Institute (IPNI, 2015) consideraram o Si como um elemento benéfico para as plantas.

O Si é considerado um elemento benéfico, pois melhora o crescimento e a produtividade das plantas, especialmente sob condições de estresses abióticos (salinidade, déficit hídrico, toxicidade por metais pesados e deficiência nutricional) e bióticos (pragas e doenças) (COSTA et al., 2022; KOVÁCS; KUTASY; CSAJBÓK, 2022; MISRA et al., 2023; OLIVEIRA FILHO et al., 2021; RAZA et al., 2023). As mudanças climáticas aumentaram os estresses abióticos, que promovem reduções nos rendimentos das culturas em até 70% (COOKE; LEISHMAN, 2016; DINH et al., 2017; RAZA et al., 2022). Essas perdas de rendimento são atribuídas a mudanças fisiológicas, bioquímicas e moleculares da planta que afetam a absorção de água e nutrientes, e regulação osmótica (MIR et al., 2022). Além disso, assimilação de nutrientes pode ser prejudicada trazendo implicações no equilíbrio homeostático de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) (HURTADO et al., 2020; ROCHA; MELLO PRADO; PICCOLO, 2020), comprometendo a proporção ideal de nutrientes necessária para o crescimento adequado da planta (TIAN et al., 2019).

As plantas acumuladoras de Si como a cana-de-açúcar apresentam teores médios nas folhas de 10 a 100 g kg^{-1} do seu peso seco (BEZERRA NETO; BARRETO, 2011; FARIAS-RAMIREZ et al., 2024; LIANG et al., 2007; MARAFON; ENDRES, 2013). A cana-de-açúcar retira grandes quantidades de nutrientes do solo devido à sua elevada produção de biomassa na parte aérea (WANDERLEY et al., 2021), no Brasil a produtividade média é de 85 Mg ha^{-1} (CONAB, 2024). Além disso, a colheita dos colmos resulta em uma exportação significativa desses nutrientes. Estudos indicam que a aplicação desse elemento é rapidamente recuperada já no segundo ciclo de cultivo, com índice de recuperação médio de 43% (CAMARGO; ROCHA; BALTIERI, 2021; CAMARGO; KEEPING, 2021). Isso sugere que, sem a reposição adequada

por meio de um manejo eficiente da fertilização, o solo pode sofrer um processo de esgotamento ao longo dos ciclos sucessivos.

Assim, a pesquisa teve como objetivo avaliar a produção de massa seca, aspectos nutricionais, razões estequiométricas C:N:P:Si e teores de Si no solo em cana-soca sob déficit hídrico e efeito residual de um fertilizante derivado de sílica amorfa (FSA) para observar com vistas a testar as seguintes hipóteses: (a) a aplicação de Si em cana-planta sob estresse hídrico promove o aumento da biomassa seca na cana-soca; (b) os benefícios do efeito residual do Si em cana-soca decorrem de melhorias nos teores nutricionais e, conseqüentemente, uma maior extração de nutrientes; (c) o efeito residual do Si pode ter efeitos sinérgicos com outros nutrientes presentes no solo, com benefícios na absorção destes pelas plantas promovendo a homeostase estequiométrica elementar, particularmente em termos de C, N e P, potencializando a resposta positiva da cana-soca em condições de déficit hídrico.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Caracterização do local

O experimento ocorreu no período de 26/10/2023 até 03/04/2024 em Casa de Vegetação, ambiente protegido, localizada no Departamento de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife-PE. A casa de vegetação possui estrutura em ferro, com frente em vidro, laterais recobertas por tela Antiafídeo e cobertura com lona plástica translúcida, a área total utilizada tem dimensões de 9 m x 4,5 m (40,5 m²).

5.2.2 Montagem do experimento e histórico do cultivo inicial da cana-planta

Para a montagem das unidades experimentais (vasos) foram utilizadas bombonas com a superfície inferior perfuradas e capacidade de 80 L, posteriormente preenchidas de forma sequencial com camada de brita de 19 mm, uma manta geotêxtil Bidim RT-08 e 90 kg de solo. O solo foi proveniente de uma área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC - UFRPE), classificado como Argissolo Amarelo Distrocoeso de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SANTOS et al., 2018), correspondente ao Ultisol Yellow Eutrophic na classificação U.S. Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022), coletado na camada superficial de 0,0 - 0,20 metros. A classe do Argissolo ocupa cerca de 24% de todo o território brasileiro (PRONASOLOS, 2024) e é amplamente utilizado para produção de cana-de-açúcar.

No plantio o material vegetal utilizado foi a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), variedade RB041443, originária da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC – UFRPE). A variedade está em crescente expansão nas áreas plantadas do estado de Pernambuco, apresentando um crescimento de 4,8% (BRAGA JUNIOR et al., 2023), indicada para sistema irrigado ou sequeiro com crescimento ereto, baixo florescimento e alta produtividade, além disso, apresenta resistência às principais doenças que atingem a cana-de-açúcar (OLIVEIRA; HOFFMANN; BARBOSA, 2021). No plantio da cana-planta foram utilizados 3 rebolos com uma gema cada, após a germinação e estabelecimento da planta realizou-se o desbaste, onde permaneceu apenas uma planta com características superiores às demais. O primeiro ciclo da cana planta teve duração de 150 dias.

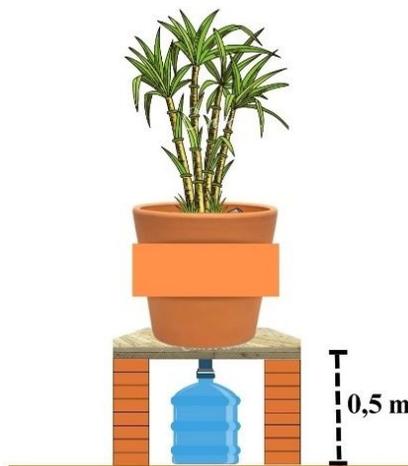
Após o corte da cana-planta aos 150 dias, no ciclo de cana-soca efetuou-se a caracterização química e física do solo conforme Teixeira et al. (2017): areia, silte e argila = 705, 79 e 216 g kg⁻¹, respectivamente, densidade do solo = 1,45 kg dm⁻³, densidade da partícula = 2,52 kg dm⁻³, porosidade = 42,46%, pH_(H₂O) = 6,10, P = 130,75 mg dm⁻³, Si (ácido acético) = 20,90 mg dm⁻³.

³, K = 0,16 cmol_c dm⁻³, Ca = 4,0 cmol_c dm⁻³, Mg = 1,36 cmol_c dm⁻³, Na = 0,28 cmol_c dm⁻³, H + Al = 3,56 cmol_c dm⁻³, capacidade de troca de cátions = 9,40 cmol_c dm⁻³, saturação por bases = 61%. No início do experimento, foram coletadas amostras compostas para determinação do teor de silício no solo de acordo com Korndörfer, Pereira e Nolla (2004), na profundidade de 15 – 30 cm, considerando as doses de Si de 0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹, sendo obtidos os valores médios de 17,05; 19,48; 22,68; 24,37 mg dm⁻³, respectivamente.

Com base no resultado da análise química de solo e necessidades da cultura foi realizada adubação com solução nutritiva de macro e micronutrientes, solução adaptada de Hoagland e Arnon (1950). A adubação foi realizada de acordo com a Recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco (CAVALCANTI et al., 2008), não foi necessário realizar correções de pH.

Os lisímetros (Figura 1) de drenagem foram construídos do mesmo modo que as unidades experimentais, porém para coleta do drenado foi adicionado ao final do vaso um adaptador agrisilsoldável com flange 32 mm e posicionado a 0,50 m de altura do piso, assim permite a coleta do excesso de água em uma garrafa de 5L.

Figura 1 – Representação da estrutura do Lisímetro



Fonte: autoral.

5.2.3 *Tratamentos e delineamento experimental*

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial 2 x 4, sendo na condição de 40% da capacidade máxima de retenção de água (CMRA) e 80% da CMRA no solo, quatro níveis do efeito residual das doses de Si (0,0; 78,0; 117,0 e 156,0 kg ha⁻¹), correspondentes a 0,0; 300,0; 450,0 e 600,0 kg ha⁻¹ do fertilizante de sílica amorfa – FSA

(Tabela 1) (Agrisilica® Granules), que foram aplicados em ciclo anterior de cana-planta. Com quatro repetições, totalizando 32 unidades experimentais.

As doses do fertilizante silicatado foram baseadas recomendações do fabricante (cana-de-açúcar: aplicar 300 - 600 kg ha⁻¹) e em estudos de Camargo et al. (2014). No ciclo anterior, a incorporação do FSA ao solo foi realizada por meio da remoção de uma porção do solo do vaso até a profundidade de 0,30 m, seguido da homogeneização com o fertilizante silicatado e posterior realocação no vaso.

Tabela 1 – Propriedades químicas do FSA (Agrisilica® Granules, NSW, Austrália)

Propriedades químicas	Valor	Propriedades químicas	Valor
Si – solúvel (%)	26,00	Fe (%)	3,55
N (%)	0,07	Mn (mg kg ⁻¹)	9,40
P (%)	0,02	Bo (mg kg ⁻¹)	61,00
K (%)	0,28	Cu (mg kg ⁻¹)	22,00
S (%)	4,00	Zn (mg kg ⁻¹)	18,00
Ca (%)	1,36	Mo (mg kg ⁻¹)	2,10
Mg (%)	0,01		

5.2.4 Manejo da irrigação

As lâminas de irrigação foram determinadas de forma direta por meio da média do balanço hídrico de três lisímetros de drenagem (Figura 1). O turno de rega foi aplicado a cada dois dias, onde as lâminas foram fornecidas de acordo com cada tratamento.

A irrigação do experimento utilizou água armazenada em duas bombonas de 100 L, conectadas a duas linhas centrais que distribuíam a água por mangueiras (PEBD PN 30 DN 16 mm) até as unidades experimentais. Cada vaso continha um gotejador autocompensante com vazão nominal de 2,0 L h⁻¹, e a pressão de serviço do sistema, mantida em 10 m.c.a., foi controlada por meio de manômetro.

A vazão do gotejador foi medida antes do início da aplicação dos tratamentos e novamente ao término do experimento, registrando valores de 1,94 e 1,89 L h⁻¹, respectivamente. Além disso, foi calculado o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD = 97,5%), seguindo a metodologia de Merriam e Keller (1978).

O controle da irrigação foi baseado no balanço hídrico dos lisímetros de drenagem, utilizando uma adaptação da equação 1, conforme a recomendação de Alves et al. (2017).

$$I = 1,1 \times (La - Ld) \quad (1)$$

Em que: I – Irrigação aplicada; La – Lâmina aplicada nos lisímetros; Ld – Lâmina drenada dos lisímetros.

Para compensar as perdas por evapotranspiração e assegurar a drenagem nos lisímetros, adicionou-se 10% ao volume de irrigação aplicado. As lâminas de irrigação nos vasos corresponderam a 40% e 80% da CMRA dos lisímetros de drenagem, sendo determinadas a partir da relação entre o volume evapotranspirado (V_e) para 100% da lâmina e a eficiência de aplicação da água (E_a), resultando no volume bruto (V_b) de irrigação. O tempo de irrigação foi calculado com base na equação 2.

$$T_i = V_b / q_e \quad (2)$$

Em que: T_i – tempo de irrigação; V_b – volume bruto; q_e – vazão do gotejador.

Após o corte da cana-planta (26/10/2023) foram realizadas irrigações diárias com lâmina correspondente a 100% CMRA, afim de garantir a rebrota da cana-soca. O início da diferenciação das lâminas de irrigação ocorreu 25 dias após o corte (DAC), a partir do dia 20/11/2023 aplicando-se as respectivas lâminas dos tratamentos descritas anteriormente.

5.2.5 Variáveis analisadas

A cana-soca foi monitorada por um período de 150 dias e realizadas avaliações da produção de massa seca, teores foliares e extração de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), C orgânico e Si, razões estequiométricas C:N:P:Si e teores de Si no solo com o intuito de entender o efeito residual da aplicação de Si via fundação ainda na cana planta. Portanto, os regimes hídricos e as doses utilizadas foram os mesmos utilizados no primeiro ciclo.

5.2.5.1 Produção de massa seca

Após 150 DAC massa fresca das folhas (MFF, g planta⁻¹), massa fresca do colmo (MFC, g planta⁻¹) e massa fresca total da planta (MFT, g planta⁻¹) foram obtidas por pesagem em balança digital das plantas em cada parcela experimental. Após a pesagem, o material foi triturado em forrageira, acondicionado em saco de papel e colocados em estufa de circulação de ar forçado (65 °C) até obtenção de peso constante da massa seca da folha (MSF, g planta⁻¹), massa seca do colmo (MSC, g planta⁻¹) e massa seca total da planta (MST, g planta⁻¹).

5.2.5.2 Diagnose foliar

Para determinar o estado nutricional da planta, aos 150 DAC, foi coletado o terço médio das folhas +3, acondicionadas em sacos de papel e colocadas em estufa com circulação forçada de ar (65 °C) até obtenção da massa seca constante. As amostras secas foram trituradas em moinho tipo Willey e armazenadas para posterior quantificação dos teores foliares.

A extração dos nutrientes (P, K, Ca e Mg) do tecido vegetal realizou-se por meio da digestão via úmida (ácido nítrico) em extrator de amostras (tipo batch – refluxo), via micro-ondas; para o Si obteve-se o extrato pelo método da mufla seguida de diluição em NaOH a 1%; e, para N e C ocorreu digestão sulfúrica em bloco digestor conforme metodologia proposta por Silva (2009).

A quantificação dos nutrientes da cana-soca foi realizada de acordo a metodologia de Bezerra Neto e Barreto (2011): N total pelo método de arraste de vapor (Kjeldahl) e titulação; C total por oxidação da matéria orgânica e titulação; P pelo método colorimétrico do molibdato-vanadato, em espectrofotômetro UV (420 nm); K pela técnica de fotometria de chama; Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica; Si, pelo espectrofotômetro do azul de molibdênio (660 nm).

As razões estequiométricas C:N, C:P, C:Si e N:P foram determinadas a partir da razão entre os teores desses elementos no tecido vegetal.

5.2.5.3 Extração e exportação de macronutrientes e Si

Após a colheita (150 DAC) foram determinadas a massa seca da folha (MSF, g planta⁻¹), massa seca do colmo (MSC, g planta⁻¹) e massa seca total da planta (MST, g planta⁻¹), conforme descritas no tópico 5.2.5.1.

Em seguida, as amostras secas foram processadas em moinho tipo Willey e armazenadas em sacos fechados para quantificação dos macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), C orgânico e Si, de acordo com as metodologias de metodologias de Silva (2009) e Bezerra Neto e Barreto (2011), descritas no item 5.2.5.2.

Os nutrientes acumulados no colmo e folhas da cana-soca foram calculados multiplicando-se a matéria seca de cada parte da planta pelo teor de nutrientes presente em cada compartimento. A quantidade total de nutrientes extraída foi determinada pela soma das quantidades acumuladas no colmo + folhas, extração total de nutrientes do solo. A quantidade de nutrientes acumulada no colmo é considerada como exportação de nutrientes, ou seja, a porção efetivamente removida do solo, uma vez que esse material é retirado da área.

5.2.5.3 Teor de Si no solo

Ao final do experimento, foram coletadas amostras de solo em todas as unidades experimentais, compreendendo três profundidades, 0 – 15 cm, 15 – 30 cm e 30 – 45 cm. A extração foi realizada com o ácido acético 0,5 mol L⁻¹, a quantificação por colorimetria (método

azul) utilizando o espectrofotômetro UV (660 nm) de acordo com Korndörfer, Pereira e Nolla (2004).

5.2.6 Análise estatística

Os dados de biomassa seca, teores nutricionais, razões estequiométricas, extração e exportação de nutrientes na planta, e teor de Si no solo foram submetidos ao teste de normalidade, homocedasticidade e análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,05$). Em seguida, os efeitos significativos para o fator dosagens de Si e lâminas de irrigação foram comparados mediante análise de regressão ($P \leq 0,05$). As análises foram realizadas utilizando o software STATÍSTICA versão 10.0 (STATSOFT, 2010).

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Produção de massa seca

A interação entre capacidade máxima de retenção de água (CMRA) e as doses de silício promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) nas variáveis massa seca das folhas (MSF), massa seca do colmo (MSC) e massa seca total da planta (MST) conforme evidenciado pelo teste F (Tabela 2).

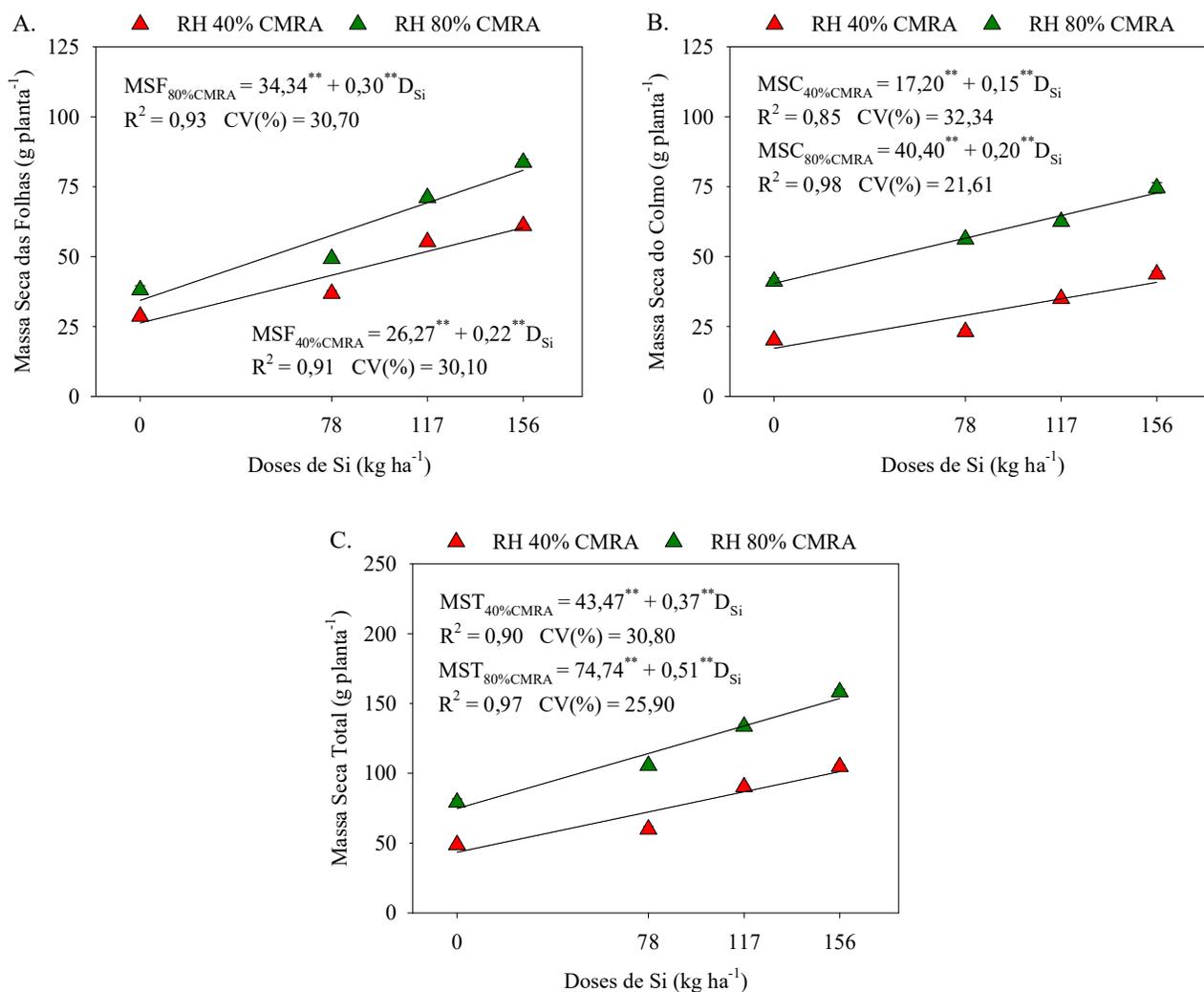
Tabela 2 – Análise de variância para massa seca das folhas (MSF), massa seca do colmo (MSC) e massa seca total da planta (MST) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

Fonte de variação	GL	MSF	MSC	MST
CMRA	1	1821,51**	6337,12**	14953,68**
Doses de Si	3	2573,07**	1194,10**	7220,91**
CMRA × Doses de Si _i	3	65,01**	55,68**	184,49**
Blocos	3	5,77 ^{ns}	6,02 ^{ns}	18,66 ^{ns}
Resíduo	21	2,86	4,49	10,39
CV	%	3,19	4,76	13,31

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

Para todas as variáveis descritas anteriormente (MSF, MSC e MST) ajustaram-se a modelos lineares ($P \leq 0,05$) conforme Figura 2. Na Figura 2A, observou-se aumentos de $0,22 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,30 \text{ g planta}^{-1}$ de massa seca das folhas (MSF) para cada incremento unitário das doses para as respectivas 40% CMRA e 80% CMRA. Em 40% CMRA, os valores médios estimados da MSF foram $26,27 \text{ g planta}^{-1}$ e $60,38 \text{ g planta}^{-1}$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, representando um aumento de 129,79%, já em 80% CMRA os valores médios foram de $34,34 \text{ g planta}^{-1}$ e $80,94 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente, representando um aumento de 135,70%.

Figura 2 – Massa seca das folhas (A), seca do colmo (B), massa seca total da planta (C) da cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

Na massa seca do colmo (MSC) os aumentos foram de $0,15 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,20 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses de Si para 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 2B). Em 40% CMRA, os valores médios estimados da MSC foram $17,20 \text{ g planta}^{-1}$ e $40,79 \text{ g planta}^{-1}$ nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, um aumento de 137,13%, já em 80% CMRA os valores médios foram de $40,40 \text{ g planta}^{-1}$ e $72,77 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente, representando um aumento de 80,13%. Para esta variável, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 78,40% na MSC quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Estudos evidenciaram que os prejuízos do déficit hídrico na estequiometria resultam em desequilíbrios nutricionais, o que poderia refletir na redução da produção de matéria seca e no acúmulo de nutrientes nos colmos; entretanto, esses fatos permanecem pouco investigados na cultura de cana-de-açúcar (COSTA et al., 2024; OLIVEIRA FILHO et al., 2021; TEIXEIRA et al., 2022a).

O aumento nas doses de Si promoveu ganhos significativos na MSC, em ambas as capacidades de campo avaliadas (Figuras 2B). Esses resultados destacam os efeitos benéficos da adubação silicatada na manutenção do crescimento e produção de biomassa da cana-soca mesmo em condições de restrição hídrica. Segundo Costa et al. (2024), esses resultados estão associados a melhorias nas trocas gasosas foliares, aumento dos teores foliares de N, P, K, C e Si, ajuste das razões estequiométricas (C:N:P:Si) e manutenção das relações hídricas das plantas.

Na massa seca total da planta (MST) observou-se aumentos de 0,37 g planta⁻¹ e 0,51 g planta⁻¹ de para cada incremento unitário das doses para 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 2C). Em 40% CMRA apresentou valores médios estimados de 43,47 g planta⁻¹ e 101,17 g planta⁻¹ para 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, um aumento de 132,75%, enquanto para 80% CMRA os valores médios foram de 74,74 g planta⁻¹ e 153,69 g planta⁻¹, respectivamente, representando um aumento de 105,63%. A combinação de 80% CMRA com 156 kg ha⁻¹ promoveu um aumento de 51,91% na MST quando comparado a 40% CMRA combinado com a mesma dose.

5.3.2 Análise nutricional

5.3.2.1 Diagnose foliar

Na Tabela 3, observa-se que houve efeito significativo ($P \leq 0,05$) da interação entre as capacidades máximas de retenção de água (CMRA) e as doses de silício nos teores foliares de nitrogênio total (N), fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na cana-soca. As CMRA (40% e 80%) e as doses promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) de forma isolada nos teores de silício (Si). As doses promoveram efeito significativo de forma isolada ($P \leq 0,05$) nos teores de potássio (K) e carbono orgânico total (C) pelo teste F.

Tabela 3 – Análise de variância para os teores de nitrogênio total (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si) e carbono orgânico total (C) em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

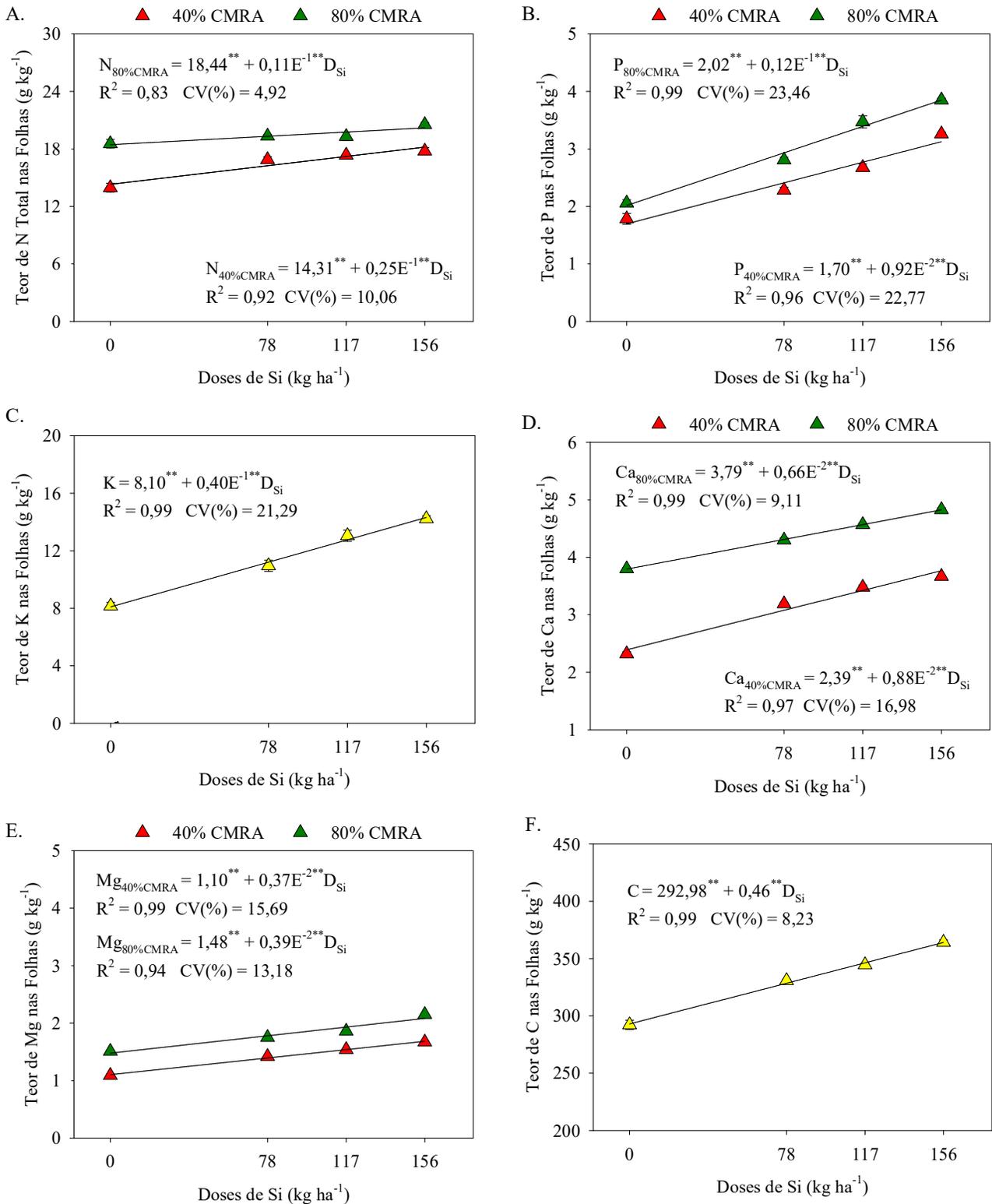
Fonte de variação	GL	Quadrado médio						
		N	P	K	Ca	Mg	Si	C
CMRA	1	69,11**	2,38**	20,54 ^{ns}	11,64**	1,20**	1,95**	420,50 ^{ns}
Doses de Si	3	12,03**	3,95**	55,69**	2,15**	0,52**	26,01**	7275,37**
CMRA × Doses de Si	3	7,94**	0,09**	0,18 ^{ns}	0,06**	0,01**	0,22 ^{ns}	78,58 ^{ns}
Blocos	3	0,95 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,05 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,07 ^{ns}	28,87 ^{ns}
Resíduo	21	10,04	0,01	0,39	0,01	0,01	0,11	26,13
CV	%	3,85	4,47	5,47	1,50	2,28	7,02	1,54

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

Na Figura 3A, observou-se aumentos nos teores foliares de nitrogênio total (N) de $0,025 \text{ g kg}^{-1}$ e $0,011 \text{ g kg}^{-1}$ para cada incremento unitário das doses em 40% (40% CMRA) e 80% da capacidade máxima de retenção de água (80% CMRA), respectivamente. Os teores médios estimados de N em plantas submetidas a 40% CMRA foram $14,31 \text{ g kg}^{-1}$ e $18,20 \text{ g kg}^{-1}$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, aumento de 27,14%, já para 80% CMRA os teores médios para as respectivas doses foram de $18,44 \text{ g kg}^{-1}$ e $20,21 \text{ g kg}^{-1}$, aumento de 9,56%. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 11,04% nos teores de N nas plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Nos teores foliares de fósforo (P) observou-se aumentos de $0,0092 \text{ g kg}^{-1}$ e $0,0120 \text{ g kg}^{-1}$ por incremento unitário das doses para 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 3B). Em 40% CMRA, os teores médios estimados de P foram de $1,69 \text{ g kg}^{-1}$ e $3,13 \text{ g kg}^{-1}$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, esses valores representam um aumento de 84,60% da maior dose em relação a menor; já para 80% CMRA os valores médios foram de $2,01 \text{ g kg}^{-1}$ e $3,85 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, representando um aumento de 91,31%. Em 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 23,00% nos teores foliares de P nas plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Figura 3 – Teores foliares de nitrogênio total (A), fósforo (B), potássio (C), cálcio (D), magnésio (E) e carbono orgânico total (F) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

O aumento foliar do teor de potássio (K) foi de 0,040 g kg⁻¹ na cana-soca por incremento unitário das doses (Figura 3C). Nas doses de 0 e 156 kg ha⁻¹ os teores médios estimados pela equação de regressão foram de 8,10 g kg⁻¹ e 14,32 g kg⁻¹, respectivamente, representando um aumento de 76,87%. O teor médio adequando na folha diagnose das plantas de cana-de-açúcar é de 12 g kg⁻¹ segundo Cavalcanti et al. (2008). Neste estudo, as plantas sob efeito residual da dose de 97,50 kg ha⁻¹ apresentaram o valor recomendado desse nutriente.

De forma semelhante, o teor de carbono orgânico (C) nos tecidos vegetais foi influenciado somente pelo efeito residual das doses, assim, observou-se aumento de 0,46 g kg⁻¹ por incremento unitário das doses (Figura 3F). Em relação as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, os teores médios estimados foram de 292,98 g kg⁻¹ e 364,12 g kg⁻¹ (+24,28%).

Na Figura 3D, observou-se aumentos nos teores foliares de cálcio (Ca) de 0,0088 e 0,0066 g kg⁻¹ para cada incremento unitário das doses nos para 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente. Os teores médios estimados de Ca em plantas submetidas a 40% CMRA foram 2,39 g kg⁻¹ e 3,76 g kg⁻¹ para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, aumento de 57,40%, já no 80% CMRA os teores médios para as respectivas doses foram de 3,79 g kg⁻¹ e 4,82 g kg⁻¹, aumento de 27,16%. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg Si ha⁻¹ promoveu um aumento de 28,19% nos teores de Ca nas plantas da cana-soca quando comparada a 40% CMRA na mesma dose.

Nos teores foliares de magnésio (Mg) observou-se aumentos de 0,0037 e 0,0039 g kg⁻¹ por incremento unitário das doses para os 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 3E). Na 80% CMRA, os teores médios estimados de Mg foram de 1,10 e 1,68 g kg⁻¹ para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, esses valores representam um aumento de 52,31% da maior dose em relação a menor; já na 80% CMRA os valores médios foram de 1,47 e 2,08 g kg⁻¹, respectivamente, representando um aumento de 41,18%. A 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg Si ha⁻¹ promoveu um aumento de 24,11% nos teores foliares de Mg nas plantas da cana-soca quando comparado ao 40% CMRA na mesma dose.

Devido a elevada produção de biomassa, a cana-de-açúcar extrai do solo e aloca na planta uma grande quantidade de nutrientes. O monitoramento da fertilidade do solo e a diagnose foliar são as principais ferramentas utilizadas para manejo nutricional da cultura (MALAVOLTA et al., 1997). De acordo com Cavalcanti et al. (2008), plantas de cana-de-açúcar nutridas adequadamente apresentam teor foliar de N total mínimo de 16 g kg⁻¹. No presente estudo, observou-se que em 40% CMRA esse teor foi obtido na dose de 67,60 kg ha⁻¹, já para 80% CMRA para todas as doses estudadas os teores foliares encontraram-se acima do teor mínimo

adequado (Figura 3A). Esses resultados destacam o benefício do efeito residual do fertilizante silicatado na cana-soca para mitigação do estresse hídrico severo.

O teor foliar de P considerado adequado para a cana-de-açúcar deve estar acima de $1,20 \text{ g kg}^{-1}$ (CAVALCANTI et al., 2008). Neste estudo, para ambas as capacidades de campo avaliados (40% CMRA e 80% CMRA), os teores foliares obtidos estiveram acima do mínimo recomendado mesmo nas condições sem aplicação de fertilizante silicatado. Provavelmente, esse resultado deve-se aos altos teores presentes no solo conforme descrito no item 5.2.2. O P é de fundamental na formação de proteínas e processos como a fotossíntese, divisão celular e armazenamento de energia, sendo indispensável no estado de crescimento vegetativo da cana-açúcar, além disso, é um dos nutrientes que mais limitam a produção (SIMÕES NETO et al., 2009; TAIZ et al., 2017).

Plantas de cana-de-açúcar apresentam teor médio de cálcio de 4 g kg^{-1} na folha diagnose (CAVALCANTI et al., 2008). No presente estudo, observou-se que em 40% CMRA esse teor mínimo recomendado para plantas bem nutridas não foi obtido em nenhuma das doses aplicadas, já em 80% CMRA esse teor mínimo foi obtido na dose de $31,58 \text{ kg ha}^{-1}$. Esses resultados destacam o benefício do fertilizante silicatado combinado com a maior disponibilidade de água no solo para as plantas. De acordo com Malavolta et al. (1997) o cálcio apesar de ser facilmente liberado na solução do solo, a sua disponibilidade para as plantas é moderada, podendo ser limitada em condições de déficit hídrico. Além disso, ainda segundo os autores, o Ca é considerado um nutriente de pouca mobilidade no floema e sua redistribuição entre os órgãos da planta praticamente não ocorre, o que pode gerar carência nas folhas mais novas.

O teor de Mg na folha diagnose considerado adequado para a cana-de-açúcar deve estar acima de 2 g kg^{-1} (CAVALCANTI et al., 2008). Para a 40% CMRA esse teor mínimo não foi atingido em nenhuma das doses aplicadas, no entanto, em 80% CMRA esse teor médio foi obtido em plantas sob dose de $135,46 \text{ kg ha}^{-1}$. O magnésio apresenta moderada disponibilidade para as plantas, de modo geral, sua concentração na solução do solo é superior à de K^+ , mas sua taxa de absorção é muito inferior, principalmente devido à falta de um mecanismo especial de absorção e transporte através da membrana plasmática. Além disso, sua absorção pode ser reduzida pelo excesso de outros cátions, especialmente de K^+ e NH_4^+ e, pela deficiência hídrica no solo (MALAVOLTA et al., 1997).

O Carbono, hidrogênio e oxigênio constituem cerca de 80-90% da matéria seca da planta, sendo constituintes de componentes orgânicos e envolvidos em processos enzimáticos. O

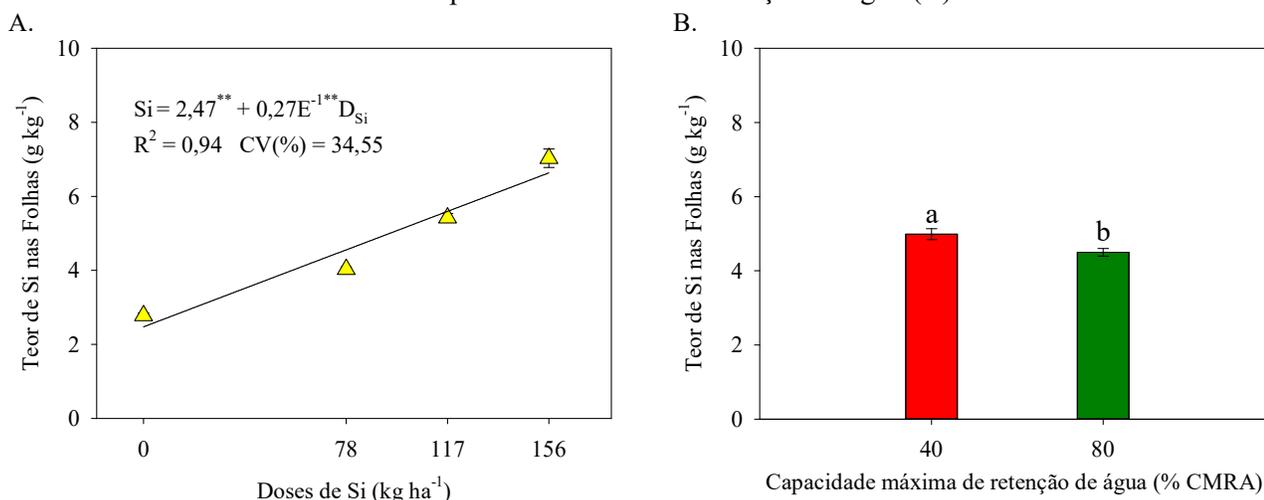
carbono participa do grupo carboxílico e é absorvido na forma de CO_2 da atmosfera e na forma HCO_3^- da solução do solo (TAIZ et al., 2017).

Embora a maioria dos estudos (HAO et al., 2020; TOMBEUR et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2022a) relatem que o aumento dos teores foliares de Si está negativamente correlacionada com os de C nas plantas, Dutra et al. (2023) avaliando três variedades de cana-de-açúcar (RB92579, RB021754 e RB036066) submetidas a diferentes formas de aplicação de Si (sem aplicação de silício, aplicação de Si via foliar e via solo) não obtiveram diferenças significativas nos teores foliares de carbono orgânico com teor médio de 390 g kg^{-1} .

Porém, no presente estudo, o aumento das doses elevou significativamente os teores de C nas folhas nas plantas indicando um efeito sinérgico, uma vez que os teores foliares de Si também aumentaram conforme pode ser observado posteriormente na Figura 3. A incorporação de C em tecidos fotossinteticamente ativos promovem aumentos significativos na produtividade, uma vez que as plantas de cana-de-açúcar demandam C para produção de sacarose, respiração e síntese da parede celular (TEIXEIRA et al., 2022a; DUTRA et al., 2023), corroborando com os dados de biomassa das folhas e colmos apresentados anteriormente.

Para os teores foliares de silício (Si) observou-se um aumento de $0,027 \text{ g kg}^{-1}$ por incremento unitário das doses (Figura 4A). Os teores médios nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} foram de $2,47 \text{ g kg}^{-1}$ e $6,64 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, aumento de 168,45%. Para 40% CMRA e 80% CMRA apresentaram teores médios de $4,99 \text{ g kg}^{-1}$ e $4,50 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, uma redução de 9,89% (Figura 4B).

Figura 4 – Teores foliares de silício (Si) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si (A) e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água (B)



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} - doses de Si.

As plantas acumuladoras de Si como a cana-de-açúcar apresentam teor médio nas folhas de 10 g kg^{-1} equivalente a 1% do peso seco (BEZERRA NETO; BARRETO, 2011). Os valores obtidos para todas as doses estiveram abaixo do teor citado anteriormente (média de 0,5%), no entanto, cabe destacar que as doses do fertilizante silicatado foram aplicadas no ciclo de cana planta, desse modo, quantidades significativas haviam sido extraídas pelas plantas. Avaliando a variedade RB966928 sob déficit hídrico de 30 e 70% CMRA, sem e com a aplicação de fertilizante silicatado (silicato de sódio e potássio) via fertirrigação e foliar, Teixeira et al. (2022a) obtiveram teores médios foliares entre 3 e 4 g kg^{-1} aos 160 dias após o transplantio, corroborando com os achados do presente estudo.

A incorporação de Si nos tecidos vegetais pode substituir parcialmente o C em compostos orgânicos da parede celular (NEU et al., 2017), isso porque o Si é imobilizado nas paredes celulares como fitólitos, que é constituído por uma combinação de biomoléculas e que passa a participar como material estrutural (TEIXEIRA et al., 2022a). De acordo com Hao et al. (2020) essa substituição parcial é de interesse biológico porque o custo energético (NADPH e ATP) para incorporação de Si em compostos estruturais, comparado aos compostos orgânicos, é 50 vezes menor devido à sua alta permeabilidade nas bicamadas lipídicas. Portanto, as plantas podem direcionar essa energia para otimizar o metabolismo de defesa contra o déficit hídrico, principalmente em estratégias que permitam a manutenção da absorção de água pelas raízes das plantas.

5.3.2.2 Razões estequiométricas C:N:P:Si em folhas

A interação entre as capacidades máximas de retenção de água (CMRA) e as doses de silício promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) na razão estequiométrica carbono orgânico:silício (C:Si) pelo teste F (Tabela 4). De forma isolada, as CMRA e as doses promoveram efeito significativo ($P \leq 0,01$) na razão carbono orgânico:fósforo (C:P). A razão carbono orgânico:nitrogênio total (C:N) apresentou efeito significativo ($P \leq 0,01$) para o fator CMRA, enquanto a nitrogênio total:fósforo (N:P) foi significativa para as doses de forma isolada.

Tabela 4 – Análise de variância para as razões carbono orgânico:nitrogênio total (C:N), carbono orgânico:fósforo (C:P), carbono orgânico:silício (C:Si) e nitrogênio total:fósforo (N:P) em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

Fonte de variação	GL	Quadrado médio			
		C:N	C:P	C:Si	N:P
CMRA	1	59,65**	3834,69**	547,80**	0,07 ^{ns}
Doses de Si	3	0,96 ^{ns}	4012,55**	4166,98**	14,48**
CMRA × Doses de Si	3	5,62 ^{ns}	77,51 ^{ns}	64,23*	1,61 ^{ns}
Blocos	3	0,73 ^{ns}	137,25 ^{ns}	26,83 ^{ns}	0,43 ^{ns}
Resíduo	21		100,27	20,67	0,24
CV	%	4,60	7,98	5,91	7,30

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

A razão carbono orgânico:nitrogênio total (C:N) reduziu 13,65% com o aumento de 40% CMRA para 80% CMRA, apresentando valores médios de 20,01 e 17,28, respectivamente (Figura 5A).

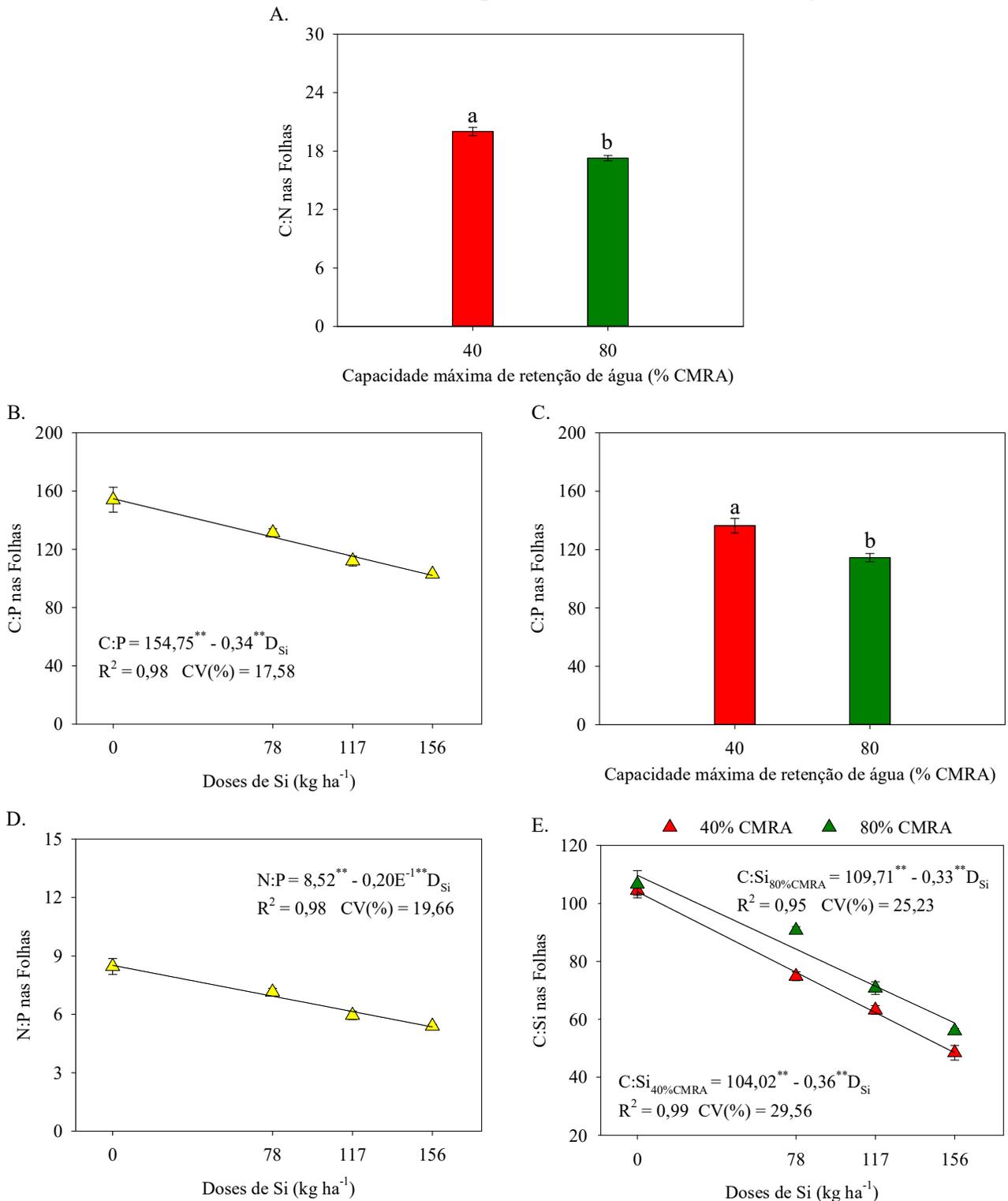
De forma semelhante a variável descrita anteriormente, a razão carbono orgânico:fósforo (C:P) também reduziu 16,05% com o aumento de 40% CMRA para 80% CMRA, sendo obtidas razões de 136,39 e 114,50, respectivamente (Figura 5B). Avaliando o efeito residual das doses constatou-se uma redução na razão C:P de 0,34 por incremento unitário das doses. Os valores médios estimados das razões C:P de 154,75 e 101,71 (-34,27%) referentes as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente.

A razão carbono orgânico:silício (C:Si) reduziu 0,36 e 0,33 por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 5C). Em 40% CMRA, as razões C:Si foram de 109,71 e 58,23 (-46,92%) para as doses de 0 e 156 kg ha⁻¹, respectivamente, já para 80% CMRA os valores médios da razão foram 104,04 e 47,86 (-53,99%) para as respectivas doses.

O efeito residual do aumento das doses também promoveu redução da razão nitrogênio total:fósforo (N:P), sendo de 0,20 por incremento das doses (Figura 5D). Nas doses de 0 e 156 kg ha⁻¹ observou-se valores médios da razão N:P de 8,52 e 5,40 (-36,62%), respectivamente.

As razões estequiométricas C:N:P referem-se às proporções de C, N e P estabelecidas para o crescimento ideal das plantas. No entanto, sob condições de estresse por déficit hídrico, a proporção estequiométrica ideal é perdida, induzindo uma nova proporção de C:N:P como forma de adaptação a tal condição.

Figura 5 – Razões carbono orgânico:nitrogênio total (A), carbono orgânico:fósforo (B e C), nitrogênio total:fósforo (D) e carbono orgânico:silício (E) de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

As razões estequiométricas C:N, C:P e N:P em plantas podem indicar a capacidade fotossintética de fixação de C com base no acúmulo de N e P (COSTA et al., 2024; MELLO PRADO; SILVA, 2017; RIVAS-UBACH et al., 2012), desse modo, é natural que estas razões estequiométricas indiquem a capacidade fotossintética da planta. A redução C:N em condições de menor estresse, ou seja, em 80% CMRA no presente trabalho (Figura 5A) indica a incorporação do C nas partes estruturais da planta favorecendo seu crescimento, por meio da síntese da parede celular e, conseqüentemente, a produção de biomassa.

A redução das razões estequiométricas C:P (Figura 5B) e N:P (Figura 5D) em plantas sob maiores doses (78 a 156 kg ha⁻¹) indicam que o C assimilado foi utilizado para o crescimento e ao fornecimento de energia para o metabolismo primário, já na condição sem aplicação (0 kg ha⁻¹) (Figura 5B e D) e para 40% CMRA (Figura 5C) o aumento dessas razões indicam um maior gasto energético de P (COSTA et al., 2024; RIVAS-UBACH et al., 2012), principalmente nas formas NADPH e ATP para a ativação dos mecanismos de defesa associados ao metabolismo secundário das plantas, bem como reduções nas concentrações de açúcares e aminoácidos.

O Si é encontrado predominante nas paredes celulares das plantas na forma de sílica amorfa (NEETHIRAJAN et al., 2009) e em complexos orgânicos com celulose (TOMBEUR et al., 2020), hemicelulose (HE et al., 2015). De acordo com Hao et al. (2020) a formação desses compostos orgânicos de Si na parede celular é uma síntese com baixo custo energético, e diferentemente da lignina, que exige um alto custo energético para sua formação (SCHOELYNCK et al., 2010). Plantas que recebam Si induz a redução do teor de C na parede celular modificando a relação estequiométrica C:Si, principalmente sob déficit hídrico encontrado em plantas da família Poaceae (ROCHA et al., 2021).

Para ambas as capacidades de campo houveram reduções significativas para a razão C:Si (Figura 5E), segundo Teixeira et al. (2022a) essa condição sugere a assimilação do C para o metabolismo primário (síntese de parede celular, respiração e produção de sacarose), associado ao aumento nos teores de Si nos tecidos foliares, principalmente na forma de sílica amorfa.

Trabalho realizado por Teixeira et al. (2022a) com cana-de-açúcar e cana-energia sob déficit hídrico (70%CC) obtiveram valores médios de 20 C:N, corroborando com os achados da presente pesquisa com 80% CMRA. Teixeira et al. (2022a) também encontram valores médios de 200 C:P e 12 N:P na ausência de Si com 30%CC, a presente pesquisa obteve valores próximos, sendo 160 C:P e 9 N:P com dose 0 kg ha⁻¹ e 40% CMRA.

5.3.2.3 Extração e exportação de nutrientes

Na Tabela 5, observa-se que houve efeito significativo ($P \leq 0,01$) da interação entre as capacidades máximas de retenção de água (CMRA) e as doses de silício na extração e exportação de nitrogênio total (N), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e silício (Si) na cana-soca conforme evidenciado pelo teste F.

Tabela 5 – Análise de variância para extração e exportação de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si) e carbono orgânico total (C) em plantas de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água

EXTRAÇÃO							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	N	P	K	Ca	Mg	Si
CMRA	1	5,30**	0,34**	24,89**	0,41**	0,11**	0,29**
Doses de Si	3	2,45**	0,49**	9,83**	0,19**	0,06**	0,77**
CMRA × Doses de Si	3	0,14**	0,03**	1,03**	0,01**	0,01**	0,02**
Blocos	3	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Resíduo	21	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
CV	%	3,70	4,60	5,77	3,38	4,55	5,99
EXPORTAÇÃO							
Quadrado médio							
Fonte de variação	GL	N	P	K	Ca	Mg	Si
CMRA	1	1,24**	0,13**	17,94**	0,09**	0,04**	0,16**
Doses de Si	3	0,24**	0,03**	4,72**	0,03**	0,01**	0,13**
CMRA × Doses de Si	3	0,03**	0,01**	0,71**	0,01**	0,01**	0,01**
Blocos	3	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}
Resíduo	21	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CV	%	9,42	6,08	7,15	6,41	9,10	5,12

** , * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, e ^{ns} - não significativo, pelo teste F. GL - Grau de liberdade; CMRA – Capacidade máxima de retenção de água; CV - Coeficiente de variação.

Na Figura 6A, observou-se aumento na extração de nitrogênio total (N) de $0,062 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,01 \text{ g planta}^{-1}$ para cada incremento unitário das doses em 40% (40% CMRA) e 80% da capacidade máxima de retenção de água (80% CMRA), respectivamente. As extrações médias de N em plantas submetidas a 40% CMRA foram $0,3944 \text{ g planta}^{-1}$ e $1,3616 \text{ g planta}^{-1}$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, aumento de 245,23%, já para 80% CMRA as extrações médias para as respectivas doses foram de $0,8741 \text{ g planta}^{-1}$ e $2,4341 \text{ g planta}^{-1}$, aumento de 178,47%.

Similar aos resultados obtidos nesta pesquisa, Teixeira et al. (2022a) avaliando a resposta da variedade RB966928 sob déficit hídrico (30% e 70% CC), associada a tratamentos sem e com a aplicação de fertilizante silicatado (silicato de sódio e potássio) via fertirrigação obtiveram valores médios da extração de N de $2,7 \text{ g planta}^{-1}$ e $3,5 \text{ g planta}^{-1}$ para os tratamentos sem e com aplicação de Si, respectivamente na umidade de 30% CC aos 160 dias após o transplântio (DAT). Destaca-se que as divergências nos valores médios se devem,

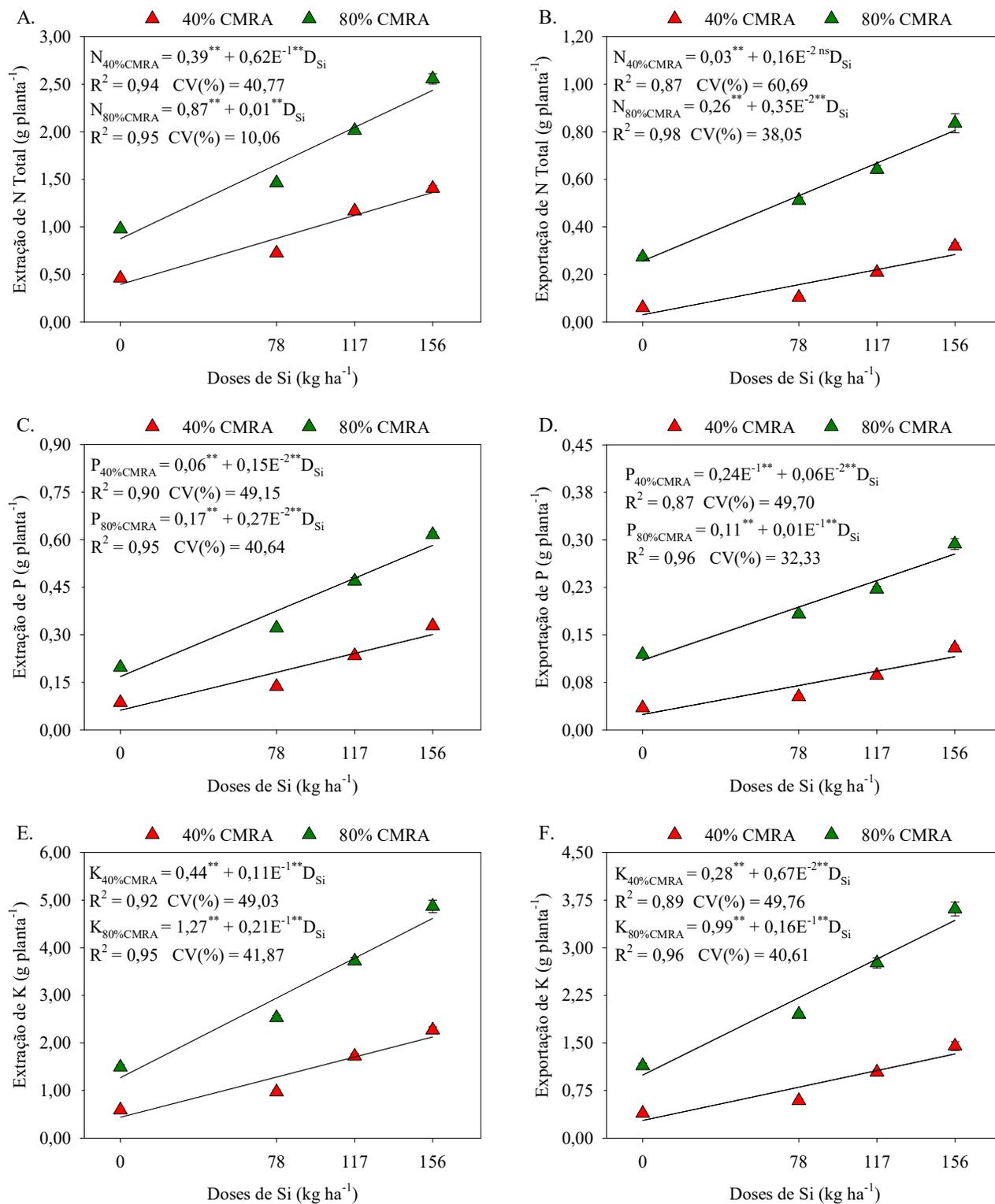
principalmente, a variedade utilizada e a via de aplicação do fertilizante silicatado distintos do presente estudo, no entanto, ressalta-se o efeito benéfico da aplicação do Si em condições de déficit hídrico severo.

A exportação de N aumentou $0,0016 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0035 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 6B). Em 40% CMRA, as exportações de N foram de $0,0302 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,2798 (+826,49\%)$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, já para 80% CMRA os valores médios da exportação foram $0,2563 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,8023 \text{ g planta}^{-1} (+213,03\%)$ para as respectivas doses. Teixeira et al. (2022a) avaliando a cana-de-açúcar (RB966928) sob déficit hídrico (30% CC), sem e com a aplicação de fertilizante silicatado via fertirrigação, obtiveram valores médios da exportação na condição sem aplicação de Si de $1,32 \text{ g planta}^{-1}$ e com aplicação de 1,65 aos 160 DAT.

Na extração de fósforo (P) observou-se aumentos de $0,0015 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0027 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses para 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 6C). Em 40% CMRA, os teores médios estimados de P foram de $0,0618 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,2958 \text{ g planta}^{-1}$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, esses valores representam um aumento de 378,64% da maior dose em relação a menor; já para 80% CMRA os valores médios foram de $0,1680 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,5892 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente, representando um aumento de 250,71%. Em 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 99,19% na extração de P nas plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose. Para P, os valores médios observados por Teixeira et al. (2022a) para a variedade RB966928 na condição de déficit hídrico de 30% CC, sem e com a aplicação de Si, os valores médios da extração na condição sem aplicação de Si foram de $0,07 \text{ g planta}^{-1}$ e com aplicação de $0,11 \text{ g planta}^{-1}$ aos 160 DAT.

De maneira análoga a variável descrita anteriormente, a exportação de P aumentou $0,0006 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,001 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 6D). Em 40% CMRA, as exportações de P foram de $0,0243 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,1179 (+385,19\%)$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, já para 80% CMRA os valores médios foram $0,1100 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,2816 \text{ g planta}^{-1} (+156,00\%)$ para as respectivas doses. Para exportação de P, Teixeira et al. (2022a) observaram valor médio de $0,074 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,11 \text{ g planta}^{-1}$ para as condições sem e com Si, respectivamente, na umidade de 30% CC.

Figura 6 – Extração e exportação de nitrogênio (A e B), fósforo (C e D) e potássio (E e F), respectivamente, de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

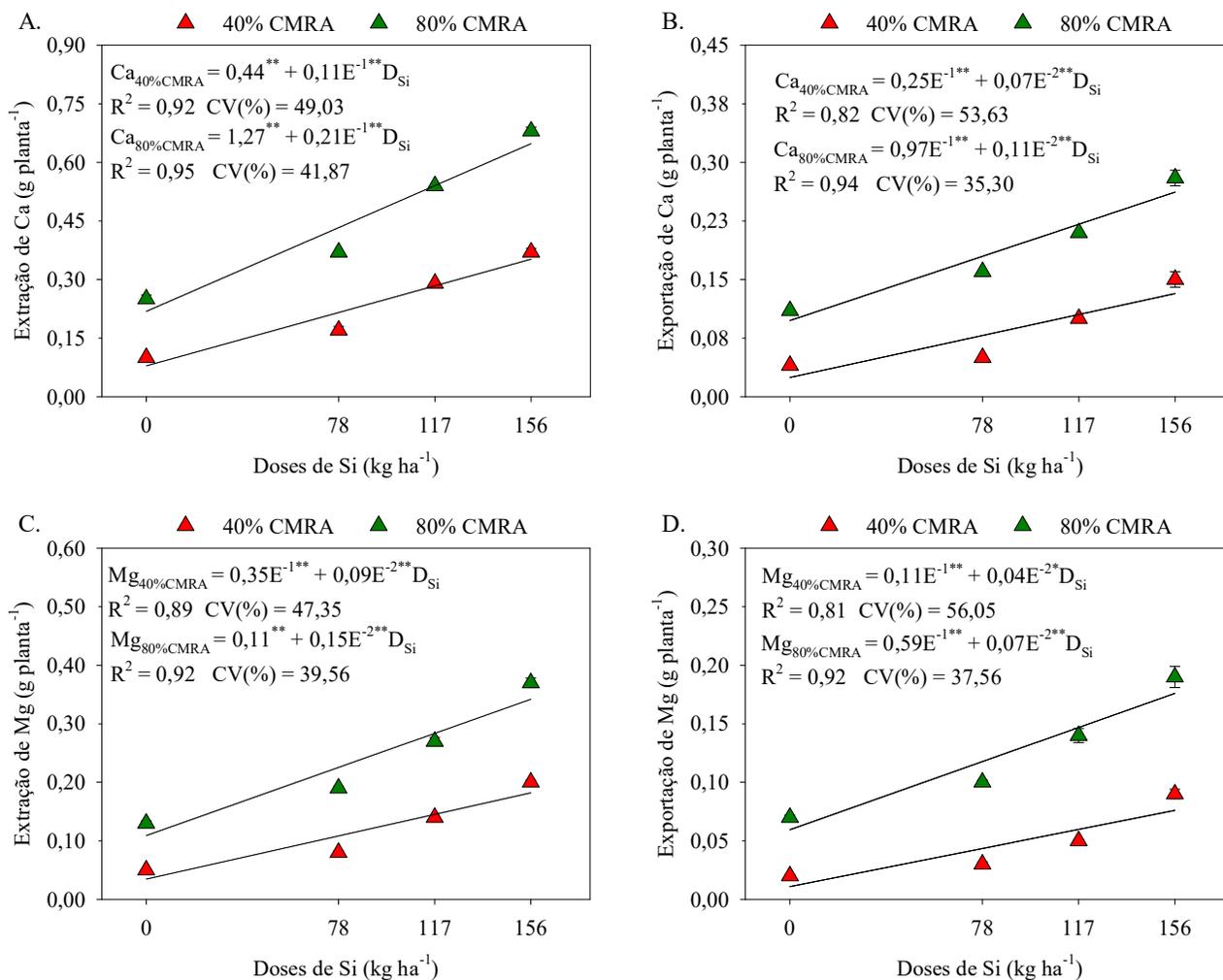
O potássio (K) apresentou aumentos na extração sendo estes de $0,011 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,021 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente (Figura 6E). Para 40% CMRA, as plantas de cana-soca apresentaram valores médios da extração de K de $0,4380 \text{ g planta}^{-1}$ e $2,1228 \text{ g planta}^{-1}$ (+384,66%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, enquanto em 80% CMRA esses valores foram $1,2683 \text{ g planta}^{-1}$ e $4,6223 \text{ g planta}^{-1}$ (+264,45%) para as respectivas doses. Em 80% CMRA combinado com a doses de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento médio de 117,75% na extração de K pela cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Na exportação de K (figura 6F), observou-se que a exportação de K aumentou $0,0067 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,016 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA. Nas doses de 0 e 156 kg ha^{-1} foram obtidos valores médios de exportação de K de $0,2780 \text{ g planta}^{-1}$ e $1,3232 \text{ g planta}^{-1}$ (+375,97), respectivamente, em 40% CMRA. Para 80% CMRA os valores médios foram de $0,9931 \text{ g planta}^{-1}$ e $3,4267 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente, representando um aumento de 245,05%. Em 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 158,97% na extração de K nas plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Na Figura 7A, observou-se aumentos nas extrações de cálcio (Ca) de $0,011 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,021 \text{ g planta}^{-1}$ para cada incremento unitário das doses em 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente. As extrações médias estimadas de Ca em plantas submetidas a 40% CMRA foram $0,0809 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,3461 \text{ g planta}^{-1}$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, aumento de 327,81%, já para 80% CMRA os teores médios para as respectivas doses foram de $0,2176 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,6544 \text{ g planta}^{-1}$, aumento de 200,74%. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 89,08% na extração de Ca nas plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

As exportações de Ca aumentaram $0,0007 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0011 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 7B). Em 40% CMRA, as exportações de Ca foram de $0,0246 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,1338 \text{ g planta}^{-1}$ (+443,90%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, já para 80% CMRA os valores médios foram $0,0974 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,2690 \text{ g planta}^{-1}$ (+176,18%) para as respectivas doses. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 101,05% na extração de Ca nas plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Figura 7 – Extração e exportação de cálcio (A e B) e magnésio (C e D), respectivamente, de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



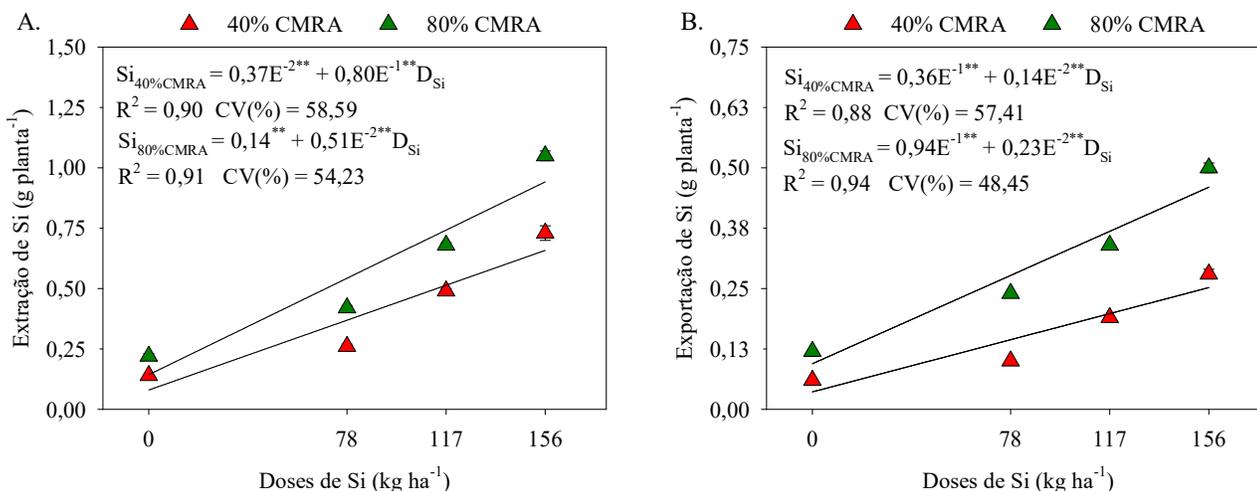
Coeficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

Na Figura 7C, observou-se aumentos de $0,0009 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0015 \text{ g planta}^{-1}$ na extração de magnésio (Mg) por incremento unitário das doses para 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente. Os teores médios de extração de Mg em 40% CMRA foram de $0,0346 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,1750 \text{ g planta}^{-1}$ (+405,78%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente; já em 80% CMRA os valores médios foram de $0,1089 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,3429 \text{ g planta}^{-1}$ (+214,88%), respectivamente. As plantas da cana-soca submetidas a 80% CMRA combinada com a dose de 156 kg ha^{-1} apresentaram um aumento de 95,94% na extração de Mg quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Na exportação de Mg, observou-se aumentos $0,0004 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0007 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 7D). Em 40% CMRA, as exportações de Mg foram de $0,0109 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0733$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, um aumento de 572,48%, já em 80% CMRA os valores médios foram $0,0594 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,1686 \text{ g planta}^{-1}$ para as respectivas doses, aumento de 183,84%.

Na Figura 8A, observou-se aumentos nas extrações de silício (Si) de $0,080 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0051 \text{ g planta}^{-1}$ para cada incremento unitário das doses em 40% (40% CMRA) e 80% da capacidade máxima de retenção de água (80% CMRA), respectivamente. As extrações médias estimadas de Si em plantas submetidas a 40% CMRA foram $0,0797 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,6569 \text{ g planta}^{-1}$ para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, aumento de 724,22%, já para 80% CMRA os teores médios para as respectivas doses foram de $0,1435 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,9391 \text{ g planta}^{-1}$, aumento de 554,43%. Em média, 80% CMRA combinado com a dose de 156 kg ha^{-1} promoveu um aumento de 42,96% na extração de Si nas plantas da cana-soca quando comparado a 40% CMRA na mesma dose.

Figura 8 – Extração e exportação de silício (A e B), respectivamente, de cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água



Coefficientes da regressão: **, * - Significativo a $P \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$). D_{Si} – doses de Si.

Estudo de Teixeira et al. (2022b) avaliando resposta da variedade RB966928 sob condições de déficit hídrico, sem e com a aplicação de fertilizante silicatado via fertirrigação e foliar, obtiveram valores médios da extração de Si sob 30% e 70% CC na condição sem aplicação de Si de $0,20$ a $0,49 \text{ g planta}^{-1}$ e com aplicação de Si de $0,52$ a $1,51 \text{ g planta}^{-1}$, corroborando com os achados do presente estudo.

As exportações de Si aumentaram $0,0014 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,0023 \text{ g planta}^{-1}$ por incremento unitário das doses nas respectivas 40% CMRA e 80% CMRA (Figura 8B). Em 40% CMRA, as exportações de Si foram de $0,0360 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,2544 \text{ g planta}^{-1}$ (+606,67%) para as doses de 0 e 156 kg ha^{-1} , respectivamente, já para 80% CMRA os valores médios da razão foram $0,0943 \text{ g planta}^{-1}$ e $0,4531 \text{ g planta}^{-1}$ (+380,49%) para as respectivas doses. As plantas da cana-soca sob 80% CMRA combinada com a dose de 156 kg ha^{-1} apresentaram um aumento de 78,11% na extração de Si quando comparado a 40% CMRA na mesma dose. Na pesquisa citada anteriormente, Teixeira et al. (2022b) observaram exportações de Si na condição sem aplicação de Si na ordem de 0,05 a $0,24 \text{ g planta}^{-1}$ para 30% e 70% CC, respectivamente, e com aplicação de Si de 0,21 a $0,90 \text{ g planta}^{-1}$, nas respectivas lâminas. Os autores destacam a necessidade da reposição do Si em ciclos sucessivos, priorizando vias de aplicações eficientes devido à alta exportação do elemento do solo.

A extração obedeceu a seguinte ordem decrescente: 40% CMRA e 80% CMRA ($K > N > Si > Ca > P > Mg$). Orlando Filho (1983) avaliando duas variedades de cana-de-açúcar (Co419 e CB41-76) sob regime de sequeiro e em diferentes tipos de solos, observaram a seguinte ordem decrescente de extração de nutrientes: $K > N > Ca > Mg > P$, semelhante ao observado no presente estudo. Sob condições de estresse salino, Morais (2020) avaliando a cana-de-açúcar (RB92579) irrigada com água salobras (CEa: 0,0; 2,0; 4,0; 6,0 e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$), observou a seguinte ordem decrescente: $N > K > Ca > Mg > P$. Assim, pode-se destacar que a ordem de extração de nutrientes pela cana-de-açúcar é influenciada pela idade da planta, condições de estresse, manejo de água e tipo de solo.

A exportação obedeceu a seguinte ordem decrescente: 40% CMRA e 80% CMRA ($K > N > Si > Ca = P > Mg$). As quantidades médias de macronutrientes e Si acumuladas no colmo, que correspondem ao exportado pela variedade RB041443 representaram 16,95% e 31,86% (N), 38,74% e 53,06% (P), 62,72% e 75,51% (K), 34,74% e 41,22% (Ca), 47,95% e 52,66% (Mg), 39,14% e 51,41% (Si) para as condições de 40% CMRA e 80% CMRA, respectivamente, do total acumulado na parte aérea das plantas.

Morais (2020) obteve valores médios de exportação em plantas sob estresse salino de 78,65% (N), 72,99% (P), 81,74% (K), 90,65% (Ca) e 88,61% (Mg) do total acumulado na parte aérea das plantas, valores mais elevados do que os obtidos nesta pesquisa. Já em estudos realizados por Orlando Filho (1983), a exportação foi de 58,04% (N), 57,89% (P), 44,82% (K), 54,02% (Ca) e 67,34% (Mg). Cabe destacar que em ambos os estudos citados, os valores médios das exportações foram obtidos ao final do ciclo da cultura, com duração média de 12 meses, divergindo do atual estudo onde o corte foi realizado com 5 meses.

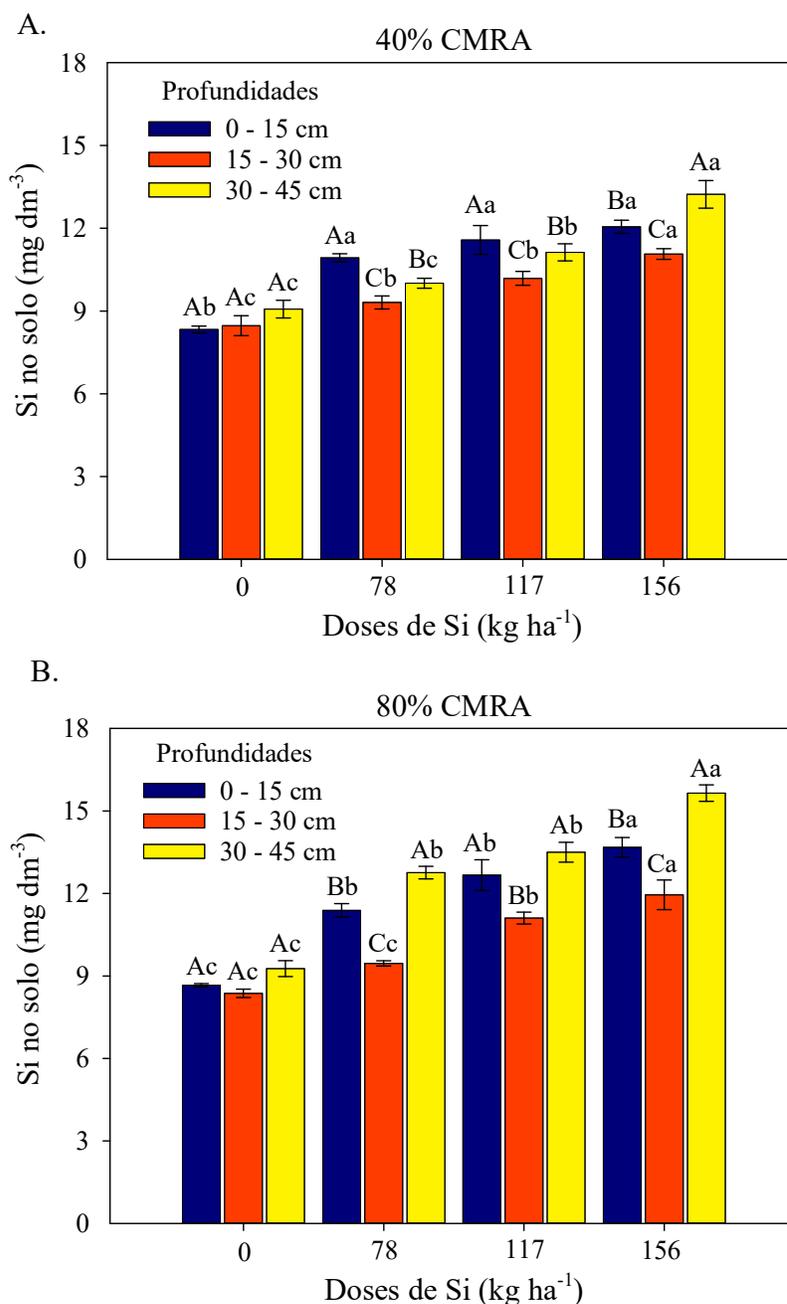
Pode-se observar que, de maneira geral, as plantas sob estresse hídrico mais severo (40% CMRA) acumularam mais macronutrientes e Si (exceto o K) nas folhas. Vale ressaltar que quantidade de nutrientes acumulada nos colmos não participa da ciclagem de nutrientes, uma vez que não retorna para o solo, desse modo, pode haver deficiência nutricional no solo ao longo dos ciclos consecutivos se o aporte de nutrientes via fertilizantes não for realizado de forma adequada.

5.3.4 Teor de Si no solo

Na Figura 9, observa-se os teores médios de Si nas camadas de 0 – 15 cm, 15 – 30 cm e 30 – 45 cm nas diferentes doses de Si para as condições de 40% (Figura 9A) e 80% CMRA (Figura 9B).

Não houve diferença significativa entre as camadas avaliadas na dose de 0 kg ha⁻¹ de Si para ambas as condições de disponibilidade hídrica, sendo observados teores médios de 8,62 e 8,77 mg dm⁻³ para 40% (Figura 9A) e 80% CMRA (Figura 9B), respectivamente. Nas demais doses de Si, de modo geral, observou-se diferenças significativas entre as camadas avaliadas. Destaca-se que em ambas condições de umidade do solo, a camada de 15 – 30 cm apresentou os menores teores de Si para as doses avaliadas (exceto 0 kg ha⁻¹), diferindo estatisticamente das demais camadas ($P \leq 0,05$).

Figura 9 – Teores de silício em solo cultivado com cana-soca sob efeito residual de doses de Si e submetidas a 40% (A) e 80% (B) da capacidade máxima de retenção de água



*Médias seguidas de mesma letra não estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a $P \leq 0,05$. Letras maiúsculas comparam os teores de Si nas camadas dentro de cada dose de Si, e letras minúsculas comparam os teores de Si entre doses de Si na mesma camada. As barras representam erro padrão da média ($n = 4$).

Sob condições de déficit hídrico, a umidade do solo na camada superficial pode ser reduzida rapidamente, principalmente, devido ao processo de evaporação, limitando a dissolução dos elementos presentes no solo e, assim, a sua disponibilidade para as plantas. Na profundidade de 15 – 30 cm, a retenção de umidade pode ser relativamente maior, devido as características do

sistema de irrigação por gotejamento favorecendo a dissolução do Si. De acordo com Inman-Bamber, Lakshmanan e Park (2012) a cana-de-açúcar desenvolve um sistema radicular profundo, mas a maior densidade de raízes frequentemente nos primeiros 30 cm de profundidade, assim, as raízes podem explorar essa região com maior intensidade, aumentando a absorção dos elementos disponíveis. Já na profundidade de 30 – 45 cm, a menor concentração de raízes pode ter reduzido a absorção do Si.

5.4 Conclusões

O efeito residual das doses crescentes de Si promoveu aumentos significativos na produção de massa seca das folhas e colmos da cana-soca sob estresse hídrico. Houve aumentos nos teores foliares e extrações de nutrientes N, P, K, Ca, Mg e do C orgânico nas folhas da cana-soca sob efeito residual de doses de Si, bem como alterações positivas nas razões estequiométricas C:N:P:Si. A cana-soca apresentou a mesma ordem de extração e exportação de nutrientes para as condições de capacidade máxima de retenção de água, independe dos níveis de déficit hídrico e doses de Si, ou seja, apresentou a extração $K > N > Si > Ca > P > Mg$ e para exportação foi $K > N > Si > Ca = P > Mg$, o Si atua como mitigador do déficit hídrico sem modificar a priorização da absorção de nutrientes. Para ambas as condições de restrição hídrica a maior extração de Si ocorreu na profundidade de 15 – 30 cm, indica a necessidade de posicionar o fertilizante silicatado nessa profundidade, garantindo disponibilidade onde a absorção é mais eficiente. Os resultados destacam o Si como um aliado na redução dos impactos da seca na cana-soca, mantendo a eficiência na absorção de nutrientes e favorecendo um cultivo mais sustentável e produtivo.

Referências Bibliográficas

- AAPFCO. Association of American Plant Food Control Officials. **In official publication: AAPFCO**, Publ. n. 67. In: J.V. Slater (ed.) West Lafayette. 2014. 95p.
- ALVES, E. S.; LIMA, D. F.; BARRETO, J. A.S.; SANTOS, D. P.; SANTOS, M. A. L. Determinação do coeficiente de cultivo para a cultura do rabanete através de lisimetria de drenagem. **IRRIGA**, v. 2, p. 194-203, 2017. <https://doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p194-203>
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.
- BRAGA JUNIOR, R. L. C.; LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; KANTHACK, R. A. D.; SILVA, D. N.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T. N.; SILVA, V. H. P.; RODRIGUES, P. E.; CARREGARI, H. R.; ANJOS, I. A. **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - safra 2022/23**. (Série Tecnologia APTA. Boletim Técnico IAC, 235). 2023. 71p.
- CAMARGO, M. S.; KEEPING, M. G. Silicon in sugarcane: availability in soil, fertilization, and uptake. **Silicon**, v. 13, p. 3691-3701, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00935-y>
- CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, v. 167, p. 64–75, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.009>
- CAMARGO, M. S.; ROCHA, G.; BALTIERI, G. J. Silicate fertilization in sugarcane: silicon availability, uptake, and recovery index over two consecutive cycles. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 21, p. 2403–2411, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00531-y>
- CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SILVA, D. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JÚNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2.ed. Recife: Instituto Agrônômico de Pernambuco, 2008. 198p.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. v.12 - safra 2024/2025 - Terceiro levantamento. Brasília, 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 26 janeiro 2025.
- COSTA, M. G.; MELLO PRADO, R.; PALARETTI, L. F.; SOUZA JÚNIOR, J. P. The effect of abiotic stresses on plant C:N:P homeostasis and their mitigation by silicon. **The Crop Journal**, v. 12, p. 340–353, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.11.012>
- COSTA, M. G.; SARAH, M. M. S.; MELLO PRADO, R.; PALARETTI, L. F.; PICCOLO, M. C.; SOUZA JÚNIOR, J. P. Impact of Si on C, N, and P stoichiometric homeostasis favors nutrition and stem dry mass accumulation in sugarcane cultivated in tropical soils with different water regimes. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p 1–19, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.949909>

DINH, T. H. K.; WATANABE, K.; TAKARAGAWA, H.; NAKABARU, M.; KAWAMITSU, Y. Photosynthetic response and nitrogen use efficiency of sugarcane under drought stress conditions with different nitrogen application levels. **Plant Production Science**, v. 20, p. 412–422, 2017. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1371570>

DUTRA, A. F.; LEITE, M. R. L.; MELO, C. C. F.; AMARAL, D. S.; SILVA, J. L. F.; MELLO PRADO, R.; PICCOLO, M. C.; MIRANDA, R. S.; SILVA JÚNIOR, G. B.; SOUSA, T. K. S. A.; MENDES, L. W.; ARAÚJO, A. S. F.; ZUFFO, A. M.; ALCÂNTRA NETO, F. Soil and foliar Si fertilization alters elemental stoichiometry and increases yield of sugarcane cultivars. **Scientific Reports**, v. 13, p. 1-10, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43351-z>

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, p. 11–17, 1994.

EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of Applied Biology**, v. 155, p. 155–160, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2009.00343.x>

FARIAS-RAMÍREZ, A. J.; DUARTE, S. N.; MORENO-PIZANI, M. A.; COSTA, J. O.; BARROS, T. H. S.; COELHO, R. D. Combined effect of silicon and nitrogen doses applied to planting furrows on sugar, biomass and energy water productivity of sugarcane (*Saccharum* spp.), **Agricultural Water Management**, v. 296, p. 108796, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108796>

HAO, Q.; YANG, S.; SONG, Z.; LI, Z.; DING, F.; YU, C.; HU, G.; LIU, H. Silicon Affects Plant Stoichiometry and Accumulation of C, N, and P in Grasslands. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p 1–10, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01304>

HAYNES, R. J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition Soil Science**, v. 177, p. 831–884, 2014. <https://doi.org/10.1002/jpln.201400202>

HAYNES, R. J. Significance and role of Si in crop production. **Advances in Agronomy**, v. 146, p. 83-166, 2017. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.06.001>

HE, C.; MA, J.; WANG, L. A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall office. **New Phytologist**, v. 206, n. 3, p 1051–1062, 2015. <https://doi.org/10.1111/nph.13282>

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. **The Water-culture Method for Growing Plants Without Soil**. California: University of California, p. 32, 1950.

HURTADO, A. C.; CHICONATO, D. A.; MELLO PRADO, R.; SOUSA JUNIOR, G. S.; OLIVERA VICIEDO, D.; PICCOLO, M. C. Silicon application induces changes C:N: P stoichiometry and enhances stoichiometric homeostasis of sorghum and sunflower plants under salt stress. **Saudi Journal Biological Sciences**, v. 27, p. 3711–3719, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.017>

INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P.; PARK, S. Sugarcane for water-limited environments: Theoretical assessment of suitable traits. **Field Crops Research**, v. 134, p. 95-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.05.004>

IPNI. International Plant Nutrition Institute. **Nutri-facts**. Silicon. n.14. 2015.

KATZ, O.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; PRAKASH, N. B.; SCHALLER, J. Silicon in the soil-plant continuum: Intricate feedback mechanisms within ecosystems. **Plants**, v. 10, p. 652, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10040652>

KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante**. Boletim Técnico nº 02. Uberlândia, 2004. 50p.

KOVÁCS, S.; KUTASY, E.; CSAJBÓK, J. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production. **Plants**, v. 11, p. 1-22, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11091223>

LIANG, Y.; SUN, W.; ZHU, Y.-G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environ Pollution**, v. 147, p. 422-428, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319p.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Silicon: fertilization and nutrition in higher plants. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, p. 380-388, 2013. <http://dx.doi.org/10.4322/rca.2013.057>

MELLO PRADO, R.; SILVA, G. P. Ecological Response to Global Change: Changes in C:N:P Stoichiometry in Environmental Adaptations of Plants. **Plant Ecology - Traditional Approaches to Recent Trends**, p. 147-163, 2017. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.69246>

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: A guide for management**. Logan: Utah State University, 1978. Disponível: https://pdf.usaid.gov/pdf_docs/pnaag745.pdf Acesso em: 15 jun. 2023.

MIR, R. A.; BHAT, B. A.; YOUSUF, H.; ISLAM, S. T.; RAZA, A.; RIZVI, M. A.; CHARAGH, S.; ALBAQAMI, M.; SOFI, P. A.; ZARGAR, S. M. Multidimensional role of silicon to activate resilient plant growth and to mitigate abiotic stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1-26, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.819658>

MISRA, V.; MALL, A. K.; ANSARI, S. A.; RAHEEM, A.; TRIPATHI, M. K.; ANSARI, M. I. Silício como nutriente benéfico para aumento de produtividade e tolerância ao estresse abiótico/biótico em cana-de-açúcar. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 54, p.102944, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102944>

MORAIS, J. E. F. **Uso de águas salobras e fração de lixiviação no cultivo da cana-de-açúcar**. 2020. 157f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

NEETHIRAJAN, S.; GORDON, R.; WANG, L. Potential of silica bodies (phytoliths) for nanotechnology. **Trends in Biotechnology**, v. 27, p. 461–467, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2009.05.002>

NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, E. G. Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, v. 7, p. 1-8, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep40829>

OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; MELLO PRADO, R.; TEIXEIRA, G. C. M.; ROCHA, A. M. S.; SOUZA JUNIOR, J. P.; PICCOLO, M. C.; ROCHA, J. R. Silicon attenuates the effects of water deficit in sugarcane by modifying physiological aspects and C:N:P stoichiometry and its use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 255, p. 107006, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107006>

OLIVEIRA, R. A.; HOFFMANN, H. P.; BARBOSA, G. V. S. Liberação nacional de variedades RB de cana-de-açúcar. Curitiba: UFPR, **RIDESA**, 2021. 79p.

ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: USP-FEALQ, 1983. 369p.

PRONASOLOS. Programa Nacional de Solos do Brasil. **Solos do Brasil**. Disponível: <<http://pronasolos.agenciazetta.ufla.br/solos-do-brasil>>. Acesso em: 28/07/2024.

RAZA, A.; TABASSUM, J.; ZAHID, Z.; CHARAGH, S.; BASHIR, S.; BARMUKH, R.; KHAN, R. S. A.; BARBOSA, F.; ZHANG, C.; CHEN, H.; ZHUANG, W.; VARSHNEY, R. K. Advances in “omics” approaches for improving toxic metals/metalloids tolerance in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 794373, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.794373>

RAZA, T.; MAZAHIR, A.; AMNA; IMRAN, S.; KHAN, M. Y.; REBI, A.; RAFIE-RAD, Z.; EASH, N. S. Impact of silicon on plant nutrition and significance of silicon mobilizing bacteria in agronomic practices. **Silicon**, v. 15, p. 3797–3817, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02302-z>

RIVAS-UBACH, A.; SARDANS, J.; PÉREZ-TRUJILLO, M.; ESTIARTE, M.; PEÑUELAS, J. Strong relationship between elemental stoichiometry and metabolome in plants. **PNAS**, v. 109, p. 4181–4186, 2012. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116092109>

ROCHA, J. R.; MELLO PRADO, R.; PICCOLO, M. C. New outcomes on how silicon enables the cultivation of *Panicum maximum* in soil with water restriction. **Scientific Reports**, v. 12, p. 1897, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05927-z>

ROCHA, J. R.; MELLO PRADO, R.; TEIXEIRA, G. C. M.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B. SI fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n. 4, p. 631–643, 2021. <https://doi.org/10.1111/jac.12479>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, p. 532, 2018.

SCHOELYNCK, J.; BAL, K.; HANS, B.; OKRUSZKO, T.; MEIRE, P.; STRUYF, E. Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose? **New Phytologist**, v. 186, p. 385–391, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03176.x>

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. rev. ampli. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.1, p.840-848, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700005>

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 13.ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, p.410, 2022.

STATSOFT. INC. Statistica: data analysis software system, version 10.0. 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; OLIVEIRA FILHO, A. S. B.; SOUSA JÚNIOR, G. S.; GRATÃO, P. L. Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports**, v. 12, p. 17487, 2022b. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9>

TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R.; ROCHA, A. M. S.; PICCOLO, M. C. Silicon as a sustainable option to increase biomass with less water by inducing carbon: nitrogen: phosphorus stoichiometric homeostasis in sugarcane and energy cane. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1-18, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826512>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, p. 573, 2017.

TOMBEUR, F.; LINDEN, C. V.; CORNÉLIS, J.; GODIN, B.; COMPÈRE, P.; DELVAUX, B. Soil and climate affect foliar silicification patterns and silica-cellulose balance in sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Plant Soil**, v. 452, p. 529-5466, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04588-z>

TIAN, D.; REICH, P. B.; CHEN, H. Y. H.; XIANG, Y.; LUO, Y.; SHEN, Y.; MENG, C.; HAN, W.; NIU, S. Global changes alter plant multi-element stoichiometric coupling. **New Phytologist**, v. 221, p. 807–817, 2019. <https://doi.org/10.1111/nph.15428>

WANDERLEY, L. R. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS, R. L. Nutritional Requirement by Irrigated Brazilian Sugarcane Varieties. **Sugar Tech**, v. 23, p. 762–775, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z>

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, os resultados deste estudo demonstraram que o efeito residual de doses de Si, proveniente de fertilizante à base de sílica amorfa no solo, promoveu aumentos significativos na produtividade das plantas de cana-soca sob estresse hídrico. Esses resultados estão associados a melhorias observadas no status hídricos, trocas gasosas, teores dos pigmentos fotossintéticos, eficiência fotoquímica, razões estequiométricas C:N:P:Si, aumentos nos teores foliares dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg, Si e do C orgânico.

Os achados desta pesquisa aprofundam o conhecimento sobre os efeitos adversos do déficit hídrico na cana-de-açúcar (RB041443), ao mesmo tempo em que ressaltam os benefícios do efeito residual do Si na atenuação desse estresse na cultura. Esses resultados fornecem suporte técnico para a adoção de estratégias de manejo mais eficazes, econômicas e sustentáveis, especialmente em regiões onde a limitação hídrica impacta o crescimento e a produtividade da cultura.

Nesse contexto, é fundamental avançar nos estudos para determinar a melhor estratégia de manejo e fornecimento de Si para as variedades de cana-de-açúcar, especialmente, aquelas recentemente lançadas como a RB041443. Isso inclui a utilização de fontes solúveis e a avaliação de diferentes métodos de aplicação, como fertirrigação e adubação foliar, visando otimizar sua absorção e aprimorar os aspectos morfofisiológicos da planta.