UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

SILÍCIO MITIGA DANOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANA-ENERGIA

Antonio Santana Batista de Oliveira Filho
Engenheiro Agrônomo

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

SILÍCIO MITIGA DANOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANA-ENERGIA

Antonio Santana Batista de Oliveira Filho
Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrarias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal)

2021

O48s

Oliveira Filho, Antonio Santana Batista de
Silício mitiga danos do déficit hídrico em soqueira de cana-de-açúcar e cana-energia / Antonio Santana Batista de Oliveira Filho. -- Jaboticabal, 2021
41 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Renato de Mello Prado

1. estresse abiótico. 2. limitação hídrica. 3. Saccharum officinarum. 4. Saccharum spontaneum. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SILÍCIO MITIGA DANOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANA-ENERGIA

AUTOR: ANTONIO SANTANA BATISTA DE OLIVEIRA FILHO
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Solos e Adubos) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. RAFAEL FERREIRA BARRETO (Participação Virtual)
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS / Chapadão do Sul/MS

Prof. Dr. JÁIRO OSVALDO CAZETTA (Participação Virtual)
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 12 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANTONIO SANTANA BATISTA DE OLIVEIRA FILHO, nascido em Balsas – MA, Brasil, em 19 de setembro de 1997, filho de Benvinda Campos de Oliveira e Antonio Santana Batista de Oliveira. Possui graduação em Agronomia, habilitação Engenheiro Agrônomo, pela Universidade Estadual do Maranhão- UEMA, Câmpus de Balsas. Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica no período de 2016 a 2019, realizando pesquisas nas áreas de tecnologia e produção de sementes, fertilidade de solo e produção vegetal, com apoio financeiro (bolsa) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq (cota 2016-2017), Universidade Estadual do Maranhão- UEMA (cota 2017-2018), e da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico do Maranhão- FAPEMA (cota 2018-2019). Participou como voluntário de projetos de extensão do Câmpus de Balsas e programas de monitoria nas disciplinas de Estatística (2017), Gênese, Morfologia e Classificação de Solos (2017 e 2018), Iniciação a Agronomia (2018) e Física do Solo (2019). Foi membro da Comissão para interiorização das ações da Assessoria de Gestão Ambiental do Câmpus de Balsas (portarias n° 600/2017- GR/UEMA e n° 502/2019- GR/UEMA) e membro do Colegiado do Curso de Agronomia do Câmpus de Balsas (portaria n° 007/2019). Em agosto de 2019, ingressou no curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado.

“Se pegue, se desapegue..
Se agite e desassossegue e se acalme também.
Se olhe, se valorize.
E se permita, errar.
Se dê de presente a chance de pelo menos tentar.
Se o SE, for bem usado, o impossível sonhado, pode SE realizar”

Bráulio Bessa

À minha família, em especial a minha mãe e meu pai que mesmo com todas as dificuldades da vida nunca mediram esforços para que seus 9 filhos pudessem estudar.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por ter me guiado, amparado, protegido nessa trajetória e por preenchê-la com momentos especiais.

Agradeço a todos os meus familiares, sobretudo, a meus irmãos que são exemplos de caráter e perseverança e ao meu pai e minha mãe, que juntos enfrentaram tantas dificuldades para que eu pudesse estudar. Lavradores rurais, com nove filhos para criar sempre venceram as dificuldades da vida sertaneja com um sorriso no rosto e uma vontade imensa de ver seus filhos crescerem e se tornarem pessoas de bem, é não foi fácil, mas nós conseguimos, crescemos e mesmo em face de todas as dificuldades, nunca desistimos de tentar, isso só foi possível pela persistência de vocês.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pelos ensinamentos, oportunidades, paciência e preocupação com minha formação.

Agradeço aos colegas e amigos da UNESP como Gelza, Antonio Marcio, Dalila, Jonas, Jonatan, Juan, Jardel, Thiago Feliph, Danilo Passos, Lucas Ramon, María José e Helena que estiveram comigo durante essa caminhada.

Agradeço aos colegas do grupo Genplant (Grupo de Estudos em Nutrição de plantas da Unesp), pelo compartilhamento de experiências e ensinamentos.

Agradeço ao Departamento de Ciências da Produção Agrícola e a todos os colaboradores que auxiliaram na condução e análise do meu experimento.

Agradeço aos meus amigos Abimael e Eron, e aos amigos e colegas de graduação Pablo Vinicius, Maria Maray, Elane Ferreira, Katehellen Arruda, Fernanda Reis pelo apoio e incentivo na realização do mestrado.

Obrigado Universidade Estadual do Maranhão, pelos ensinamentos durante a graduação, agradeço por me oferecer professores incríveis, um ambiente de estudo e muitos estímulos para participar de atividades acadêmicas. Agradeço em especial as professoras Leandra, Adriana e Tatiane e ao professor Joel que foram minha inspiração e incentivo para que eu ingressasse no mestrado.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” /Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP/FCAV, pela oportunidade de realizar o mestrado e ampliar meus conhecimentos.

Agradeço aos professores que tive durante o mestrado, como Prof. Arthur Bernardes, Prof. Pedro Luiz, Profa. Mara Cristina, Prof. Danilo, Prof. Luiz Fabiano, Prof. José Marques Júnior e Prof. Rouverson que compartilharam seus conhecimentos em disciplinas cursadas durante o mestrado.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico- Brasil (CNPq).

A todos, Obrigado! Sintam-se abraçados....

SUMÁRIO

RESUMO ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
LISTA DE FIGURAS ..... **v**
1 INTRODUÇÃO **01**
2 REVISÃO DE LITERATURA **03**
2.1 Aspectos socioeconômicos da cana-de-açúcar e cana-energia 03
2.2 Importância do déficit hídrico 05
2.3 Importância do silício 07
2.4 Silício como mitigador de déficit hídrico 08
3 MATERIAL E MÉTODOS **10**
3.1 Material vegetal e condições de crescimento 10
3.2 Delineamento e parcela experimental 12
3.3 Fornecimento de silício 12
3.4 Análises 13
3.4.1 Conteúdo relativo de água e potencial hídrico foliar (Ψw) 13
3.4.2 Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) e vazamento de eletrólitos .. 14
3.4.3 Área foliar, número de folhas, número de perfilhos e produção de massa seca 14
3.4.4 Acúmulo de Si nas folhas e colmos 15
3.4.5 Eficiência no uso de C, N e P e relação C:N, C:P e C:Si 15
3.5 Análise estatística 15
4 RESULTADOS **15**
4.1 O fornecimento de Si via fertirrigação associado à pulverização foliar incrementa o acúmulo de Si em cana-de-açúcar e cana-energia 15
4.2 Em condições de déficit hídrico, a aplicação de Si diminui a relação C:Si e aumenta as relações de C:N e C:P, e a eficiência de uso de C, N e P, em cana-de-açúcar e cana-energia 16
4.3 A fertilização com Si aumenta o conteúdo relativo de água e o potencial hídrico foliar (Ψw), diminui o vazamento de eletrólitos e incrementa a eficiência quântica do PS II de plantas em condição de estresse hídrico 22

4.4 O Si auxilia no desenvolvimento da planta, aumentando o número de folhas e perfilhos, área foliar e produção de massa seca 24
5 DISCUSSÃO 28
6 CONCLUSÕES 32
7 REFERÊNCIAS 32

SILÍCIO MITIGA DANOS DO DÉFICIT HÍDRICO EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR E CANA-ENERGIA

RESUMO- As mudanças climáticas têm aumentado a ocorrência de secas e o uso do silício (Si) pode ser uma estratégia para atenuar o déficit hídrico nos cultivos, mas é necessário entender os mecanismos envolvidos. Objetivou-se avaliar se a aplicação de Si via fertirrigação associado com pulverização foliar mitiga os efeitos do déficit hídrico por melhorar os aspectos fisiológicos e modificar a estequiométrica C:N:P induzindo aumento da eficiência de uso destes nutrientes na soqueira de duas espécies de cana (*Saccharum officinarum* – cana-de-açúcar e *S. spontaneum* - cana-energia). Foram realizados dois experimentos em casa de vegetação, utilizando a cana-de-açúcar (variedade-RB966928) e a cana-energia (variedade-VX2). Em ambos experimentos, os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 2x2, sem déficit hídrico e com déficit hídrico severo (70% e 30% da capacidade de retenção de água no solo respectivamente) combinados sem e com aplicação de Si via fertirrigação associado à pulverização foliar, ambos na concentração de 2,5 mmol L^{-1}, dispostos em blocos casualizados. Aos 80 dias após a rebrota da soqueira avaliaram-se: acúmulo de Si, teor de C, N, P, relação C:Si, C:N e C:P, eficiência de uso de C, N e P, conteúdo relativo de água, potencial hídrico foliar, vazamento de eletrólitos, eficiência quântica do PS II, número de folhas e de perfilhos, área foliar e produção de massa seca. Na ausência de Si, o déficit hídrico prejudicou as variáveis fisiológicas e o crescimento das duas espécies de cana. O fornecimento de Si via fertirrigação associado com pulverização foliar de Si solúvel incrementou a absorção deste elemento na soqueira da cana-de-açúcar e da cana-energia cultivada, independente da condição hídrica. O Si atenuou os efeitos causados pelo déficit hídrico severo dado o aumento do conteúdo relativo de água e do potencial hídrico, diminuindo o vazamento de eletrólitos, com reflexo na eficiência da fotossíntese e também por modificar a estequiométrica C:N:P, aumentando a eficiência de uso destes nutrientes e o crescimento das duas espécies estudadas.

Palavras-chave: estresse abiótico, limitação hídrica, *Saccharum officinarum*, *Saccharum spontaneum*

SILICION MITIGATE DAMAGE FROM WATER DEFICIT IN CONVENTIONAL CANE AND ENERGY CANE

Abstract: Climate change has increased the occurrence of droughts and the use of silicon (Si) can be a strategy to mitigate the water deficit in crops, however, the mechanisms involved have to be understood. The objective of this study was to evaluate whether the application of Si via fertigation associated with leaf spray mitigates the effects of water deficit by improving the physiological aspects and modifying the C: N: P stoichiometry, inducing an increase in nutrient efficiency use in the ratoon of two species of sugarcane (*Saccharum officinarum* - sugar cane and *S. spontaneum* - energy cane). Two experiments were carried out in a greenhouse, using sugar cane (variety-RB966928) and energy cane (variety-VX2). In both experiments, the treatments were arranged in a 2x2 factorial scheme, without water deficit and with severe water deficit (70% and 30% of the water retention capacity in the soil, respectively) combined without and with application of Si via fertigation associated with foliar spraying, both at a concentration of 2.5 mmol L-1, arranged in randomized blocks. At 80 days after the regrowth of the knuckle, the following were evaluated: Si accumulation, C, N, P content, C: Si, C: N and C: P ratio, efficiency of using C, N and P, relative content of water, leaf water potential, electrolyte leakage, PS II quantum efficiency, number of leaves and tillers, leaf area and dry mass production. In the absence of Si, the water deficit affected the physiological variables and the growth of the two sugarcane species. The supply of Si via fertigation associated with foliar spraying of soluble Si increased the absorption of this element in the sugar cane and cultivated energy cane, regardless of water condition. Si attenuated the effects caused by severe water deficit given the increase in the relative water content and water potential, decreasing the leakage of electrolytes, reflecting on the efficiency of photosynthesis and also by modifying the stoichiometric C: N: P, increasing efficiency use of these nutrients and the growth of the two species studied.

Keywords: Abiotic stress, water limitation, *Saccharum officinarum, Saccharum spontaneum*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura e umidade do ar máxima e mínima no interior da casa de vegetação durante o período experimental. U min: umidade mínima, U max: umidade máxima, T min: temperatura mínima, T max: Temperatura máxima.....12

Figura 2. Acúmulo de Si nas folhas (a) e nos colmos (c) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e nas folhas (b) e nos colmos (d) de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS) sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade respectivamente para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação 16

Figura 3. Teor de C (a, b), N (c, d) P (e, f) das folhas da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico- Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação 18

Figura 4. Relação C:Si (a, b), C:N (c, d) C:P (e, f) das folhas da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico- DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.....20

Figura 5. Eficiência no uso de C (a, b), eficiência no uso de N (c, d) e eficiência no uso de P (e, f) da parte aérea da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-

DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação 21

Figura 6. Conteúdo relativo de água (a, b) e potencial hídrico foliar (c, d) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação 23

Figura 7. Índice de vazamento de eletrólitos celulares (a, b) e eficiência quântica do PS II (c, d) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação 24

Figura 8. Número de folhas (a, b) e de perfilhos (c, d) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante com 1% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação 25

Figura 9. Efeito do fornecimento de Si no crescimento da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) (a) e cana-energia (*Saccharum spontaneum*) (b) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da

capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar 26

Figura 10. Área foliar (a, b) e matéria seca da parte aérea da touceira (c, d) e matéria seca da raiz da touceira (e, f) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação 27

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm aumentado o surgimento de eventos extremos como ocorrência de secas (Besharat et al., 2020) que podem prejudicar o avanço do cultivo da cana em regiões tropicais, sobretudo em áreas de solos de textura arenosa (Reichert et al., 2020).

A cana (*Saccharum* spp.) é uma espécie de ciclo semi-perene de alta produtividade devido ao processo de rebrota da soqueira (Manhães et al., 2015). É comum durante o desenvolvimento, a planta ser exposta a condições de déficit hídrico, o que limita a produção de biomassa e o desenvolvimento da cultura (Marchiori et al., 2017), dada a baixa rebrota e perfilhamento (Souza et al., 2015).

Os prejuízos do déficit hídrico no crescimento das plantas devem-se aos seus efeitos na diminuição do conteúdo de água que induz estresse oxidativo e causa danos nos processos fisiológicos da planta (Teixeira et al., 2020A) e também diminui a eficiência de uso de nutrientes (Hoang et al., 2019). Além disso, estudos recentes em outras espécies indicaram que déficit hídrico diminui a relação C:N e C:P em banana (Long et al., 2018) e a relação C:N em cacau (Lahive et al., 2018) afetando negativamente a homeostase estequiométrica das plantas.

Condições de déficit hídrico causam prejuízos importantes nas plantas, e seu crescimento dependerá da capacidade em se ajustar rapidamente à situação de estresse (Basnayake et al., 2012). Uma estratégia para mitigar os efeitos deletérios do déficit hídrico em cana seria o uso do silício (Si) porque induz diferentes mecanismos atenuadores. O benefício do Si em plantas de cana sob deficiência hídrica ocorre por aumentar o conteúdo relativo de água (Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019; Verma et al., 2019; Teixeira et al., 2020A) e o potencial hídrico dos tecidos (Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020A), atenuando o estresse oxidativo visto pela diminuição do vazamento de eletrólitos celular (Bezerra et al., 2019). Isso proporciona maior eficiência quântica do PS II (Verma et al., 2019; Teixeira et al., 2020A) resultando em maior produção de massa seca (de Camargo et al., 2017; Teixeira et al., 2020A).

Estudos com a cultura da cana têm indicado benefícios fisiológicos importantes do Si para atenuar o déficit hídrico, no entanto ainda não há estudos sobre quais os

efeitos do silício em soqueira de cana em condições de déficit hídrico, pois o corte já representa uma situação estressora, sendo os efeitos do déficit hídrico ainda mais expressivos. Além de benefícios fisiológicos, o Si pode promover outros efeitos como modificação estequiométrica das relações C com N e P na planta. Isso porque em bananeira o emprego do Si sob déficit hídrico promoveu aumento das relações C:N e C:P das folhas (Long et al., 2018). Essa modificação estequiométrica promovida pelo Si pode induzir nova homeostase, melhorando a eficiência de uso destes nutrientes e constituindo um componente importante na mitigação do déficit hídrico pois é conhecido que este estresse causa danos nutricionais na planta discutido anteriormente.

Para garantir o efeito benéfico do Si nas plantas é importante favorecer ao máximo sua absorção pela cultura da cana. Para isso, é necessário uso de fontes solúveis associado com modo de aplicação eficaz. Atualmente, novas fontes de Si solúveis em água, como o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol tem sido utilizada via solução nutritiva (Teixeira et al., 2020A) ou pulverização foliar (Santos et al., 2020) mas existem possibilidade da via fertirrigação no solo, porém faltam estudos.

Pesquisas com Si que otimizem sua absorção devem promover benefícios biológicos importantes como modificações estequiométricas que podem refletir no crescimento de plantas de cana cultivadas sob déficit hídrico. Isto porque segundo Ma et al. (2011), as Poáceas são consideradas acumuladoras de Si por possuírem transportadores específicos do elemento e isso favorece absorção e as respostas da planta. Mas apesar disso, ainda é necessário a realização de pesquisas para melhorar o entendimento destes efeitos, tanto da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) quanto na cana-energia (*Saccharum spontaneum*). A cana-energia por ter elevado teor de fibra é uma nova opção para produção de energia com sua queima, tendo alto rendimento de biomassa (Leal et al., 2013). No entanto, faltam estudos sobre sua resposta a condição de déficit hídrico e sua relação com Si. Isso é motivo de preocupação pois o seu cultivo está avançando, sobretudo, em regiões tropicais com baixa precipitação pluvial.

Para ampliar conhecimento sobre o benefício do Si nestas duas espécies sob déficit hídrico, é pertinente testar as seguintes hipóteses: i) inicialmente é importante

verificar se o fornecimento de Si via fertirrigação associado com pulverização foliar de Si solúvel garante alta absorção do elemento na soqueira da cana-de-açúcar e da cana-energia cultivada com ou sem déficit hídrico; ii) se o Si reverte os efeitos causados pelo déficit hídrico devido ao aumento do conteúdo relativo de água e do potencial hídrico diminuindo estresse oxidativo, refletindo na eficiência da fotossíntese; (iii) e se o Si provoca modificação estequiometria C:N:P suficiente para induzir nova homeostase propiciando incremento da eficiência de uso destes nutrientes e consequentemente o crescimento das duas espécies (cana-de-açúcar e cana energia).

Os resultados deste estudo permitirão avançar sobre as respostas destas espécies ao déficit hídrico tornando mais robusto o conhecimento dos efeitos do Si expondo o seu papel nutricional relacionado com o carbono ainda não explorado pela pesquisa. Portanto, essa informação tem implicação ambiental importante dada às mudanças climáticas na região de cultivos destas espécies.

Realizou-se essa pesquisa objetivando-se avaliar se a aplicação de Si via fertirrigação associado com pulverização foliar mitiga os efeitos do déficit hídrico a partir da melhoria de aspectos fisiológicos e modificação estequiométrica C:N:P induzindo aumento da eficiência de uso destes nutrientes na soqueira de duas espécies de cana (cana-de-açúcar e cana energia).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos socioeconômicos da cana-de-açúcar e cana-energia.

Considerado o maior produtor mundial de cana (*Saccharum* spp.), o Brasil representa uma potência na produção de açúcar, etanol, biocombustíveis e subprodutos oriundos da cana. O setor atua de forma positiva e sustentável, produzindo etanol de segunda geração ecologicamente correto (CONAB, 2020).

A produção de cana na safra 2019/2020 foi de 642,71 milhões de toneladas, colhida em uma área de 8,44 milhões de hectares. A produção de açúcar atingiu 41,8 milhões de toneladas, e a de etanol 29,8 bilhões de litros (CONAB, 2020).

São Paulo é considerado o maior produtor nacional, estimado em uma produção de 342,6 milhões de toneladas em 4,4 milhões de hectares, representando

cerca de 51% da produção e de área plantada, o que demostra a grande importância do estado para o setor (CONAB, 2020).

O desenvolvimento da cultura depende de diversos fatores, como clima, solo, genética da planta e manejos da cultura (Dias et al., 1999). A cana é classificada como planta de metabolismo C4, com elevada capacidade de armazenamento de sacarose (Tejera et al., 2007). A produção da cana (*Saccharum* spp.) no Brasil, tem suas vantagens ligada a condições ambientais favoráveis e a grandes áreas de cultivo (CONAB, 2020), principalmente no que tange a inserção da cana em solos arenosos, que atualmente estão sendo explorados com a implantação da cultura.

Para o setor sucroalcooleiro, responsável pela produção de açúcar, etanol e derivados, predomina o cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) que apresenta alto teor de sacarose. Segundo Matsuoka et al. (2005) esta é conhecida como “cana nobre” com alto teor de sacarose, ótima aparência, colmos grossos e suculentos e ótimas características gerais para a industrialização.

No entanto, diante da necessidade do setor em ampliar a produção de etanol de segunda geração tem havido a inserção de novas espécies para o setor sucroenergético, como a cana-energia (*Saccharum spontaneum*) que apresenta alto teor de fibra, baixo de sacarose e alto rendimento de biomassa (Silva et al., 2018). A cana-de-açúcar apresenta cerca de 12% de fibras, enquanto a cana-energia pode alcançar até 30% (Tew e Cobill, 2008), resultando após a produção do etanol de primeira geração, em maior quantidade de resíduos como, bagaço, palhas e ponteiras, estes podem ser usados para produção de etanol de segunda geração, agregando valor ao processo. Quanto à morfologia e fisiologia, a cana-energia se diferencia da cana-de-açúcar por possuir colmos e folhas mais finos, maior perfilhamento e sistema profundo de raiz (Silva, 2017).

Segundo Matsuoka et al. (2005) esta é a espécie com melhores características de vigor, dureza, perfilhamento, capacidade de rebrote de soqueira, resistência a estresses, doenças e pragas. Inicialmente a cana-energia foi visada somente para cruzamentos com outras espécies no intuito de contribuir com rusticidade e resistência (Ming et al., 2006), no entanto com o reconhecimento do grande valor da biomassa da cana, a produção de fibra em vez de apenas açúcar passou a ser valorizada (Matsuoka et al., 2014).

A espécie *S. spontaneum* é a mais primitiva com ampla distribuição em regiões tropicais e subtropicais (Govindaraj et al., 2014), no entanto devido a sua menor produção de sacarose, o seu cultivo foi pouco explorado no Brasil, somente após a necessidade de ampliação da geração de etanol que a mesma passou a ganhar destaque nos últimos anos, o que acarreta a necessidade de estudos voltados para a cultura ainda pouco explorada.

Em aspectos nutricionais, estudos são escassos para a espécie, incluindo o estudo do efeito de elementos benéficos como o silício na cultura. Dadas as características da cana-energia, é muito importante que se invista na divulgação científica e transferência de tecnologia para essa espécie, contribuindo ambientalmente e economicamente com a sociedade.

De modo geral, tanto *S. officinarum e S. spontaneum* são consideradas espécies de ciclo semi perene, devido ao potencial de rebrota da soqueira, que se manejada de forma eficiente, apresenta alta produtividade por até cinco anos (Manhães et al., 2015), o que favorece o cultivo e reduz a necessidade de reforma constante dos canaviais, sendo este um procedimento de alto custo para o produtor rural. É necessário se estudar formas alternativas, para que se aumente a longevidade da soqueira sobretudo quando sujeita a condições adversas de clima, para que desse modo se possa alcançar altas produtividades por um maior período de tempo, reduzindo assim os custos com a reforma.

2.2 Importância do déficit hídrico.

As mudanças climáticas, em especial a ocorrência de secas extremas em diferentes regiões de cultivo tem incrementado a presença de déficit hídrico nas últimas décadas, que causam prejuízos significativos no desenvolvimento e na produção da cultura cana (Carneiro et al., 2020).

A deficiência hídrica representa a falta de umidade suficiente para suprir à demanda da planta para o seu satisfatório desenvolvimento (Li et al., 2009), sendo que para a cultura da cana, o consumo diário depende de vários fatores, dentre esses o material genético, estágio de desenvolvimento, e condições de cultivo (Bernardo, 2006). Os estudos sobre os danos do déficit hídrico predominam na cana-de-açúcar

(Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019; Verma et al., 2019; Teixeira et al., 2020A, Teixeira et al., 2020B) não havendo relatos na cana-energia.

Espécie de ciclo semi-perene, durante o seu desenvolvimento a cana pode ser exposta a condições de limitação e estresse hídrico, o que atinge diretamente a produção de biomassa e o desenvolvimento da cultura (Marchiori et al., 2017). O período de rebrota da soqueira é uma fase de desenvolvimento onde há expressivo efeito do déficit hídrico. Souza et al. (2015) ao avaliarem ajuste de modelos de produção para cana-soca, concluíram que a disponibilidade de água na fase de brotamento a perfilhamento intenso diminui a produtividade principalmente nos anos em que o déficit hídrico é mais intenso. Em soqueira de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de água e nitrogênio observou-se que na fase inicial de desenvolvimento da cultura houve incremento estimado na área foliar de 59,03%, entre a reposição hídrica de 0 e 100% (Alves, 2014).

O déficit hídrico na planta é mais preocupante em áreas de solos de textura arenosa que apresentam baixa retenção de água (Reichert et al., 2020), aliado a isso, no período de rebrota, a cana soca sofre ainda mais efeitos expressivos dessa limitação, pois a condição de corte representa também para a planta uma condição estressora.

O déficit hídrico é responsável por causar redução do conteúdo de água na planta, o que leva a alterações fisiológicas (Teixeira et al., 2020A), reduzindo o potencial hídrico dos tecidos (Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019), aumentado o estresse oxidativo (Bezerra et al., 2019) e reduzindo a eficiência quântica do PS II (Verma et al., 2019), devido a uma série de reações como a inibição da fotossíntese, gerando uma super-redução da cadeia de transporte de elétrons, aumentado o escape de eletróns que reagem com o oxigênio molecular (O_2) e formam espécies reativas de oxigênio (ERO) (Kim et al., 2017), o que por fim resulta em menor produção de massa seca (de Camargo et al., 2017; Teixeira et al., 2020A).

Além disso, existem indicações em outras espécies que o déficit hídrico possa diminuir a absorção de nutrientes especialmente N e P (Hamdy et al., 2016; Bista et al., 2018). Estudos recentes e inovadores sobre o déficit hídrico têm indicado modificações da estequiometria do C:N:P nas plantas verificado em algumas espécies como *Zygophyllum xanthoxylum* (Niu et al., 2019), *Panicum maximum* (Viciedo et al.,

2019) e *Stylosanthes capitata* Vogel (Viciedo et al., 2021), isso porque o contato do nitrogênio com a raíz ocorre pelo processo de fluxo de massa (Taiz et al., 2017) e para o fósforo pela difusão (Mackay e Barber, 1985) e ambos os processos dependem da disponibilidade hídrica do solo. Esse prejuízo do déficit hídrico na estequiometria induz desequilíbrio nutricional e pode refletir na quantidade de biomassa e de nutrientes acumulada, mas isso permanece desconhecido na cultura da cana-de-açúcar e cana-energia.

Desse modo, é necessário que sejam traçadas estratégias para amenizar os efeitos do déficit hídrico na cultura, para tanto, o fornecimento de silício (Si) pode promover efeitos benéficos ao desenvolvimento das culturas (Hattori et al., 2005; Amin et al., 2014; Gong et al., 2005), contribuindo de maneira importante na mitigação dos efeitos do déficit hídrico. No entanto, o efeito da aplicação de Si em cana-soca e em cana-energia (*Saccharum spontaneum*) é incipiente, o que leva a necessidade de estudos para determinar quais os efeitos do Si nessas condições de cultivo.

2.3 Importância do silício

O Si é um elemento benéfico multe estresse que têm despertado interesse pelos pesquisadores nas últimas décadas pois ele pode favorecer a produção mesmo com a ocorrência de diferentes estresses nos cultivos (Prado, 2021). O Si em solução pode iniciar sua polimerização na concentração de 3 mmol L^{-1} (Birchall, 1995), levando a formação dímeros, trímeros e cadeias poliméricas de Si (Mckeague e Cline, 1963), esses compostos não podem ser absorvidos pelas plantas, que absorvem apenas a forma monomérica do elemento. Devido à baixa concentração é necessário então que se aumente a frequência de aplicação do elemento na planta (Teixeira et al., 2020A) para que assim se possa ter um suprimento adequado do elemento.

Tem sido muito utilizado o silicato de potássio para pulverização foliar de Si (Zanão Júnior et al., 2009), no entanto estudos tem crescido principalmente com a inserção de novas fontes como o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol. Esse estabilizante possui propriedades umectantes que fazem com que haja maior permanência da gota na superfície foliar (Babiker e Duncan, 1974), aumentado o contato do produto com a folha e diminuindo a velocidade de polimerização.

Estudos em diferentes espécies relatam os benefícios da pulverização foliar de silício nas culturas como em trigo (Bukhari et al., 2015; Othmani et al., 2020), manjericão (Farouk et al., 2020) sorgo (Oliveira et al., 2019) e cana (Teixeira et al., 2020A, Teixeira et al., 2020B).

No entanto, fontes de Si solúveis em água como silicato de potássio ou silicato de sódio permite seu fornecimento em solução nutritiva viabilizando fornecer o elemento também via fertirrigação, mas faltam estudos para descrever melhor os efeitos desta forma de aplicação na cultura da cana.

Esta forma de fornecimento de Si é importante para cana após o primeiro corte, ou seja, na soqueira que não permite a incorporação do Si no solo e fonte solúvel por ter maior mobilidade no solo poderia garantir absorção e adequada nutrição da planta (Quintana, Zanini e Silva, 2012). Acredita-se que o uso da fertirrigação associado com pulverização foliar pode contribuir para o aumento da quantidade de Si absorvida pela planta, por permitir o uso de baixas concentrações em maiores frequências de aplicação.

2.4 Silício como mitigador de déficit hídrico.

Sabe se que diversas estratégias são estudadas para atenuar o déficit hídrico havendo uma promissora a partir do emprego do silício. No entanto, o elemento é encontrado em baixos teores no solo na forma prontamente disponível para as plantas (Epstein, 2009).

O benefício do Si nas plantas vai depender da capacidade de absorção do elemento pela cultura, sendo as gramíneas como a cana, acumuladoras deste elemento benéfico por possuírem transportadores específicos LSi1 o que favorece a absorção do elemento pela cultura (Mitani et al., 2008). No entanto, normalmente solos com baixo teor de Si como os Neossolos Quartzarênicos (de Oliveira et al., 2007) tem reflexo na absorção da planta devido à baixa disponibilidade para absorção.

É necessário então estratégias para elevar o aumento do teor do elemento nas plantas, sendo estudado atualmente diferentes formas e fontes de aplicação (Teixeira et al., 2020A). O aumento do teor de Si em plantas se deve principalmente a qualidade da calda pulverizada, em concentrações abaixo da que se inicia a polimerização (Birchall, 1995) do elemento benéfico impossibilitando sua absorção. Além disso,

estratégias como a utilização de estabilizante (sorbitol) na calda que também diminui a polimerização do Si (Kubicki; Heaney, 2003) pode favorecer a absorção do elemento pelas plantas.

O Si atua na proteção das plantas de forma bioquímica, fisiológica e física (Farooq e Dietz, 2015). Sendo que os estudos envolvendo Si para mitigação do déficit hídrico em cana são direcionados aos seus efeitos principalmente bioquímicos e fisiológicos (Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020A; Verma et al., 2019), agindo na manutenção do potencial hídrico foliar (Amin et al., 2014; Bezerra et al., 2019), na preservação de pigmentos fotossintéticos (Bokhtiar et al., 2012; Verma et al., 2019), no aumento da eficiência de uso da água (Ming et al., 2012), desse modo fazendo com que a planta consiga se ajustar a condição de estrese. Segundo de Camargo et al. (2017) ao realizarem experimentos com cana na presença de déficit inicial e déficit hídrico tardio associado a aplicação de 600 kg ha^{-1} de Si via solo, demostraram que a adubação com silício proporciona melhor recuperação da cana-de-açúcar logo após déficit hídrico tanto de forma precoce, quanto tardio em cultivar sensível à seca.

Estudos têm demostrado que as plantas sob estresse possuem estratégias para promover nova homeostase estequiométrica e equilibrar seu metabolismo (Prado e Silva, 2017), sendo desvendado então um efeito do Si em alterações nutricionais na planta, que pode induzir nova homeostase, atuando na eficiência de uso dos nutrientes e constituindo um componente importante na mitigação do déficit hídrico pois este estresse causa danos nutricional na planta.

Estudos realizados por Gottardi et al. (2012) indicam que o benefício do Si no aumento da absorção de N está correlacionado a regulação da transcrição de genes que codificam eficientes transportadores de nitrato. Enquanto o seu efeito na absorção de P se deve possivelmente pelo aumento da exsudação radicular de ácidos orgânicos que diminui adsorção de P inorgânico (Pi) na rizosfera favorecendo contato do nutriente com a raiz e a sua absorção radicular (Kostic et al., 2017) e pelo fato que o Si ao ocupar sítios de ligação dos coloides do solo e aumentam sua disponibilidade (Neu et al., 2017). No que tange a alterações no uso de C, estudos indicam que o Si pode ser incorporado aos tecidos foliares com menor gasto de energia em relação ao

C podendo então substituir parte deste em compostos orgânicos da parede celular, melhorando sua assimilação e utilização de C em esqueletos ativos (Raven, 1983).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material vegetal e condições de crescimento.

Foram desenvolvidos dois experimentos cultivados em vasos preenchidos com Neossolo Quartzarênico (Santos et al., 2018), no período de setembro a dezembro de 2019 com soqueira de cana (primeiro corte) em casa de vegetação da UNESP Câmpus de Jaboticabal (São Paulo- Brasil). O experimento I foi desenvolvido com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) variedade RB966928; e o experimento II, com cana-energia (*Saccharum. spontaneum*) variedade VX2, com maior teor de fibra (>28,0%) e menor teor de açúcares na forma de sacarose (<6%).

A soqueira de cana (primeiro corte) provém de plantas que receberam aplicação de Si na fase de produção de mudas pré-brotadas e na cana-planta, para tanto foi realizado o plantio dos mini-colmos em bandejas de produção de mudas preenchida com vermiculita fina. A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950) com alteração na concentração de ferro para 368 µmol L^{-1} na forma de Fe–EDDHA, conforme indicação de Cavalcante et al. (2016). A concentração da solução nutritiva durante a primeira semana de cultivo foi mantida a 25% de diluição e elevada para 50% da segunda semana até o fim da fase de formação das mudas, sendo aplicado um volume suficiente para saturação do substrato, evitando perda por lixiviação (10 mL por célula). O valor pH da solução foi ajustado para 5.5±0.2 com o uso de solução de ácido clorídrico (HCl) ou hidróxido de sódio (NaOH) ambos a 1.0 mol L^{-1}.

A fonte de Si solúvel utilizada foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, na concentração de 2.5 mmol L^{-1}. Foram realizadas 15 fertirrigações de Si com intervalos de 4 dias, a partir de 10 dias após a emergência plena dos brotos (DAE), aplicando 10 mL por muda via substrato e 1.47 ml por muda via pulverização foliar. O valor do pH da solução fertirrigada foi ajustado para 5.5±0.2. Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si nos tratamentos com

ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a 1.0 mol L^{-1} com aplicação via radicular e por pulverização foliar.

Após a fertilização com Si, aos 60 DAE, as mudas foram transplantadas para vasos de 20 dm^3 preenchidos com amostras de um Neossolo Quartzarênico (Santos et al., 2018) sendo realizadas mais 5 fertirrigações com Si com aplicação via fertirrigação associada com pulverização foliar, sendo aos 20, 35, 50, 65 e 80 dias. A aplicação do Si via fertirrigação foi realizada simulando lâmina de 5 mm de solução silicatada. A pulverização foliar foi realizada usando pulverizador manual de modo a garantir o cobrimento da folha, sem que houvesse escorrimento. O valor do pH da solução fertirrigada foi ajustado para 5.5±0.2. Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si nos tratamentos com ausência do elemento, utilizando uma solução de cloreto de potássio a 1.0 mol L^{-1} com aplicação via radicular e por pulverização foliar.

Antes do plantio da cana-planta foi realizada a análise química do solo para fins de fertilidade (Raij et al., 2001), tendo os seguintes resultados: pH($CaCl_2$): 4,3; matéria orgânica: 9 g dm^{-3}, P resina: 2 mg dm^{-3}; Ca: 3 mmolc dm^{-3}; Mg: 1 mmolc dm^{-3}; K: 0,3 mmolc dm^{-3}; Al: 0 mmolc dm^{-3}; H+Al: 16 mmolc dm^{-3}, soma de bases: 4,3 mmolc dm^{-3}; capacidade de troca de cátions: 20,3 mmolc dm^{-3}; saturação por bases (K+Ca+Mg/K+Ca+Mg+H+Al): 21%. Determinou-se o teor de Si (1 mg dm^{-3}) pelo método descrito por Korndörfer et al. (2004).

No período de implantação da cana-planta, o solo foi incubado com calcário (PRNT:125%) para elevar a saturação por bases para 60%. Realizou-se adubação com 150 mg dm^{-3} N (sulfato de amônio), P (superfosfato triplo) e K (cloreto de potássio), 5 mg dm^{-3} Zn (sulfato de Zn) e 2 mg dm^{-3} B (ácido bórico). Após o corte da cana-planta, no início do rebrote da soqueira realizou-se adubação com 160 mg dm^{-3} N (sulfato de amônia) e 60 mg dm^{-3} K (cloreto de potássio).

A temperatura máxima e mínima e a umidade relativa do ar máxima e mínima foram registradas durante todo o período experimental com auxílio de termoigrômetro (Figura 1).

A temperatura média durante o período experimental foi de 34ºC, segundo Segato et al. (2006) a cana (*Saccharum* spp.) necessita de temperaturas altas (30ºC) na fase inicial e entre 25 e 30ºC na fase de crescimento vegetativo, o que demostra

que a temperatura esteve acima do ideal, estimulando as condições de déficit hídrico, objeto de estudo desta pesquisa.

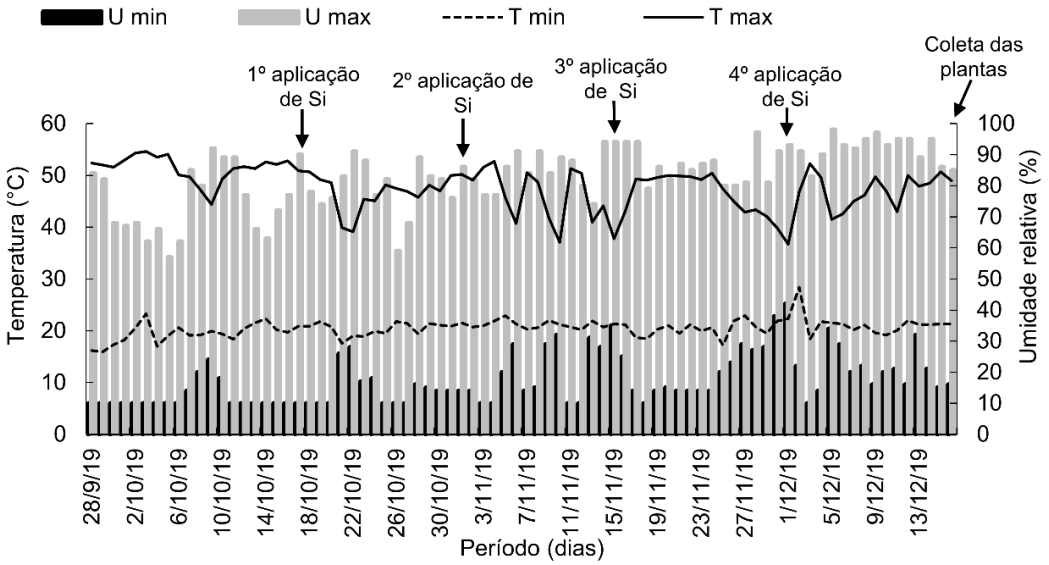

Figura 1. Temperatura e umidade do ar máxima e mínima no interior da casa de vegetação durante o período experimental. U min: umidade mínima, U max: umidade máxima, T min: temperatura mínima, T max: Temperatura máxima.

3.2 Delineamento e parcela experimental

Em ambos os experimentos os tratamentos foram arranjados em esquema fatorial 2x2, tendo duas condições hídricas: sem déficit hídrico (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico (30% da CRAS) combinados com ausência e presença de Si (2,5 mmol L^{-1}) aplicado via fertirrigação associado a pulverização foliar, dispostos em blocos casualizados em cinco repetições.

Os níveis de deficiência hídrica foram determinados conforme o trabalho realizado por Teixeira et al. (2020A), sendo 70% da CRAS uma condição hídrica adequada e 30% da CRAS como um déficit hídrico severo. A imposição do déficit hídrico ocorreu aos dois dias após a rebrota da soqueira, sendo controlada periodicamente a partir da pesagem dos vasos para reposição da água perdida por evapotranspiração (Teixeira et al., 2020A). A parcela experimental foi constituída por vaso de polipropileno com capacidade para 20 dm^3.

3.3 Fornecimento de silício

A fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (113,4 g L^{-1} de Si e 18,9 g L^{-1} de K_2O e pH 11,8). O fornecimento de Si foi realizado via fertirrigação com aplicação no solo e com a pulverização foliar. Utilizou-se a concentração de 2,5 mmol L^{-1} abaixo do indicado para o início da polimerização (Birchall, 1995), realizando quatro aplicações na soqueira, sendo aos 20, 35, 50 e 65 dias após o corte da soqueira, no período da manhã com umidade relativa do ar (%) e temperatura (ºC) iguais a 90 e 20.9; 86 e 21.5; 94 e 21.2; 91 e 28.4, respectivamente (Figura 1).

Para aplicação de Si, foi preparada calda com água deionizada tendo o valor pH ajustado para 5,0 ± 0,2 com o uso da solução de HCl (1 mol L^{-1}). A aplicação do Si via fertirrigação foi realizada simulando lâmina de 5 mm de solução silicatada e para a pulverização foliar utilizou pulverizador manual com volume de calda de 250 mL por planta. A pulverização foliar foi realizada de modo a garantir o cobrimento da folha, sem que houvesse escorrimento. Foi realizado o equilíbrio da quantidade de potássio presente na fonte de Si em plantas que não receberam a fertirrigação associada com a pulverização foliar do elemento, utilizando solução de cloreto de potássio na concentração de 0,24 mmol L^{-1} aplicado tanto via fertirrigação quanto pulverização foliar.

3.4 Análises

Aos 80 dias após a rebrota da soqueira, os experimentos foram finalizados e realizaram-se as avaliações descritas a seguir.

3.4.1 Conteúdo relativo de água e potencial hídrico foliar (Ψw)

O conteúdo relativo de água na folha foi determinado a partir da coleta de seis discos foliares da primeira folha completamente desenvolvida, sendo imediatamente pesado em balança analítica para a aferição da massa fresca do tecido (Pf). Após isso, as amostras foram reidratadas em água deionizada por 6 horas, para a obtenção da massa túrgida (Pst), fazendo-se uso de papel toalha para extrair o excesso de água. A massa seca (Ps) foi obtida após os discos permanecerem em estufa de circulação de ar forçada a 80ºC, por 24 horas Os valores do conteúdo relativo de água

foram calculados pela equação proposta por Barrs e Weatherley. (1962): [(Pf – Ps)/(Pst - Ps)] x 100.

O potencial hídrico foliar (Ψw) foi determinado no terço médio foliar da primeira folha completamente desenvolvida, com auxílio de uma câmara de pressão de Scholander (Soil Moisture Equipment, EUA). A pressão foi aplicada até que ocorresse a exsudação a partir do corte feito na folha (Turner, 1981).

3.4.2 Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) e vazamento de eletrólitos

A eficiência quântica do PS II foi estimada utilizando um fluorômetro de clorofila (Opti-sciences - Os30P). As plantas foram deixadas a adaptar-se no escuro durante um mínimo de 30 min antes da excitação do pulso de luz vermelha. As medições foram realizadas na primeira folha totalmente desenvolvida no período de 7 e 8 horas da manhã.

Na avaliação dos danos à integridade das membranas celulares, foi utilizado o método da determinação do índice de vazamento de eletrólitos, proposto por Dionisio-Sese e Tobita (1998). Foram coletados três discos foliares da primeira folha completamente desenvolvida e emergidas em béquer contendo 20 mL de água deionizada, à temperatura ambiente, por 2 horas. Após este período foi realizada uma leitura de condutividade elétrica da solução (EC1) com auxílio de um condutivímetro de bancada (Medidor digital TDS-3). Em seguida, as amostras foram submetidas a aquecimento em autoclave a 121°C, por 20 min, e após esfriamento realizado uma nova leitura de condutividade elétrica final (EC2). O extravasamento de eletrólitos foi determinado considerando a seguinte fórmula: EC1/EC2 x 100.

3.4.3 Área foliar, número de folhas, número de perfilhos e produção de massa seca

A área foliar foi medida a partir do uso do medidor de área foliar (L-3100, LICOR, EUA). O número de folhas e perfilhos foram obtidos a partir da contagem manual. Posteriormente as amostras foram lavadas em água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de HCl (0,3% v/v) e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (65 ± 5°C), até atingir massa

constante e então, foi obtida a massa seca de cada parte da planta. Em seguida as folhas e colmos foram moídas separadamente em moinho tipo Willey.

3.4.4 Acúmulo de Si nas folhas e colmos

Para a determinação do acúmulo de Si, incialmente obteve-se o teor de Si a partir da digestão das amostras de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) a qual consiste no método da digestão úmida, pela adição de peróxido de hidrogênio (H2O2) e hidróxido de sódio (NaOH), com a reação induzida em estufa a 95°C, pelo período de quatro horas. A determinação da concentração de Si foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm, pelo método de colorimetria conforme indicação de Korndörfer et al. (2004). O acúmulo de Si nas folhas e colmo foi então calculado como o produto entre o teor de Si e a produção de massa seca.

3.4.5 Eficiência no uso de C, N e P e relação C:N, C:P e C:Si

A massa seca foi usada para medir o teor de C e N por combustão a seco (1000 °C) usando o equipamento (LECO Truspec CHNS). O teor de P foi obtido através da digestão nitricoperclórica, de acordo com os métodos descritos por Bataglia et al. (1983). Com os dados do acúmulo de C, N e P na parte aérea e da massa seca realizou-se o cálculo da eficiência de utilização destes nutrientes conforme indicação de Siddiqi e Glass. (1981). A relação C:Si, C:N e C:P foi realizada atráves da razão entre os teores dos elementos.

3.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($p \leq 0,05$), e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, utilizando o software estatístico AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

4 RESULTADOS

4.1 O fornecimento de Si via fertirrigação associado à pulverização foliar incrementa o acúmulo de Si em cana-de-açúcar e cana-energia.

O déficit hídrico diminuiu o acúmulo do Si nas folhas e nos colmos de cana-de-açúcar (Figura 2a, c) e cana-energia (Figura 2b, d). Por outro lado, a aplicação de Si via fertirrigação associado à pulverização foliar incrementou o acúmulo do elemento, tanto nas folhas como no colmo, em cana-de-açúcar (Figura 2a, c) e cana-energia (Figura 2b, d), na presença e na ausência de déficit hídrico.

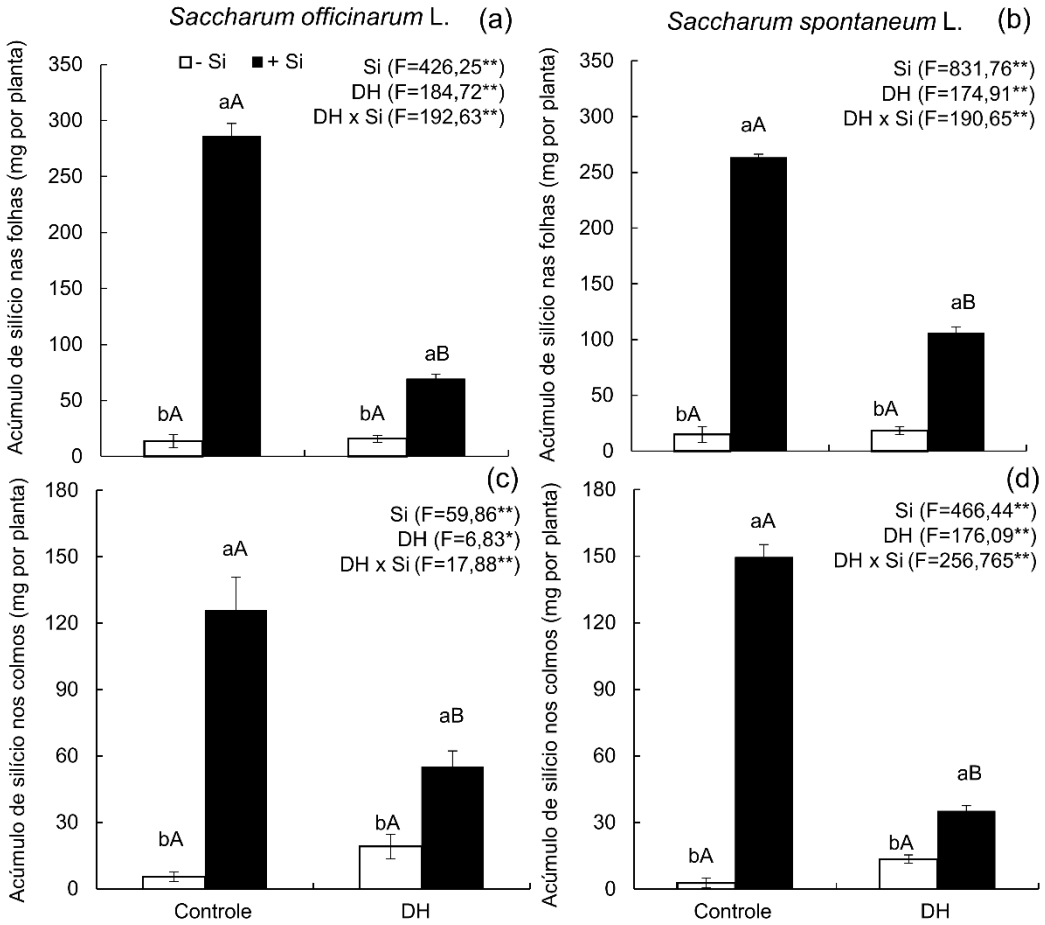

Figura 2. Acúmulo de Si nas folhas (a) e nos colmos (c) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e nas folhas (b) e nos colmos (d) de cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) cultivadas sem déficit hídrico- Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS) sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade respectivamente para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

4.2 Em condições de déficit hídrico, a aplicação de Si altera os teores de N, P, diminui a relação C:Si e aumenta as relações de C:N e C:P, e a eficiência de uso de C, N e P, em cana-de-açúcar e cana-energia.

O teor de carbono (C) das plantas de cana-de-açúcar e cana-energia não foi alterado tanto pelas condições de déficit hídrico como pela aplicação de Si (Figura 3a, b). O teor de nitrogênio (N) de plantas de cana-de-açúcar (Figura 3c) e cana-energia (Figura 3d) é aumentado em condições de déficit hídrico, quando comparadas a plantas sem restrição hídrica, em condição de déficit hídrico, para ambas as espécies estudadas, plantas sem a aplicação de Si obtiveram maior teor de N (Figura 3c, d). Em condições de déficit hídrico, tanto para cana-de-açúcar quanto cana-energia, plantas sem fertilização com silício obtiveram maior teor de fósforo (P) em relação a plantas não fertilizadas sem restrição hídrica (Figura e, f). A condição de déficit hídrico não alterou o teor de P de plantas fertilizadas com Si. Em condição de déficit hídrico, plantas não fertilizadas obtiveram maior teor de P para ambas as espécies (Figura 3e, f)

A relação C:Si das folhas de plantas sem a aplicação de Si foi diminuída em condições de déficit hídrico. Em plantas fertilizadas com o elemento, essa relação não se alterou com a imposição do déficit hídrico na folha de cana-de-açúcar (Figura 4a) e cana-energia (Figura 4b). A aplicação de Si independentemente do déficit hídrico, diminui a relação C:Si da folha de cana-de-açúcar (Figura 4a) e cana-energia (Figura 4b).

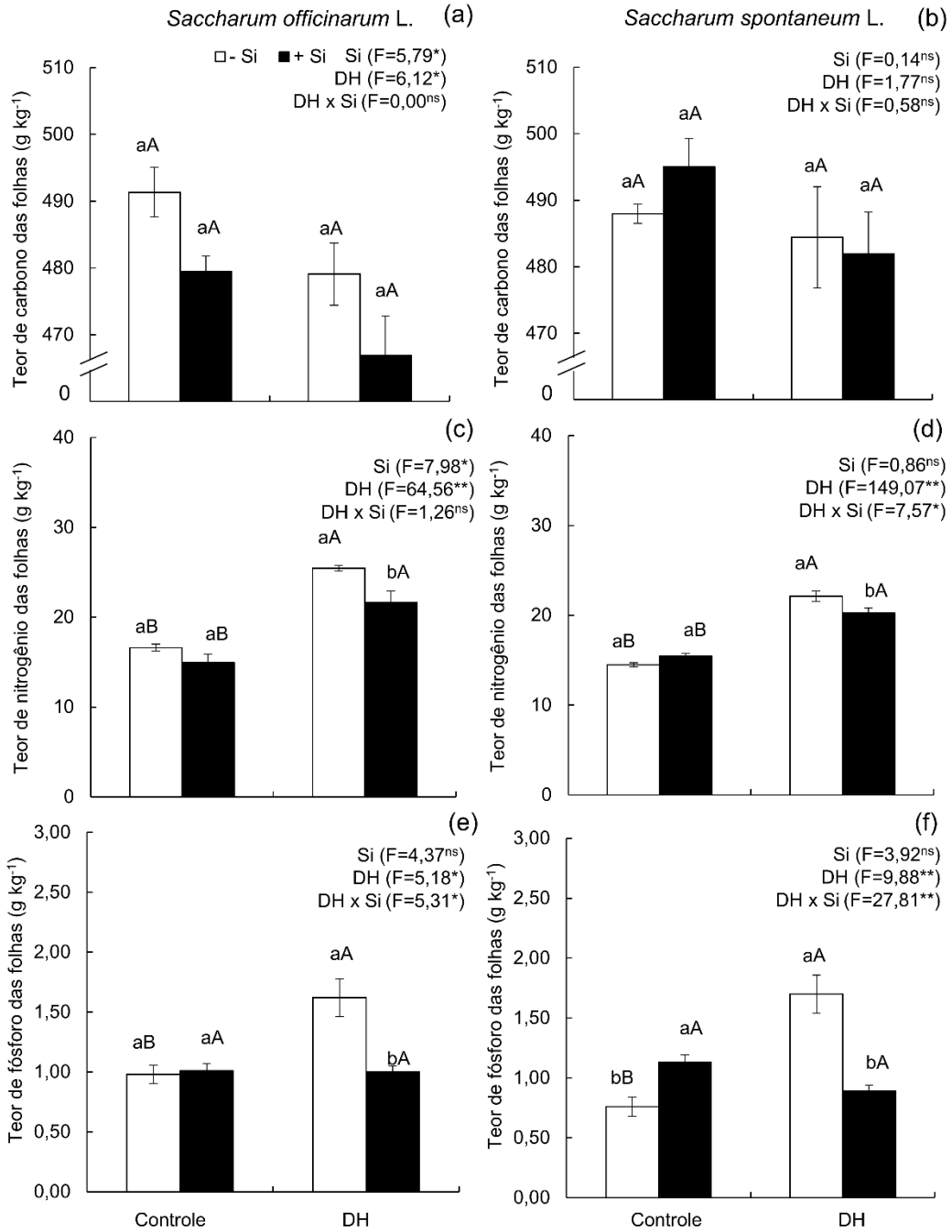

Figura 3. Teor de C (a, b), N (c, d) P (e, f) das folhas da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico- Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico- DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

A relação C:N das folhas de plantas de cana-de-açúcar (Figura 4c) e cana-energia (Figura 4d) foi diminuída em condições de déficit hídrico, quando comparadas a plantas sem restrição hídrica. A aplicação de Si em condições de déficit hídrico, aumentou a relação C:N das folhas de cana-de-açúcar (Figura 4c) e cana-energia (Figura 4d). A relação C:P das folhas das plantas foi diminuída em condições de déficit hídrico de cana-de-açúcar (Figura 4e) e cana-energia (Figura 4f), com exceção das folhas fertilizadas com Si para ambas as espécies. Em condições de déficit hídrico, a aplicação de Si, aumentou a relação C:P das folhas de ambas as espécies (Figura 4e, f)

A eficiência de uso de C, N e P diminuiu em plantas submetidas à condição de déficit hídrico, quando comparadas às plantas sem déficit hídrico na cana-de-açúcar (Figura 5a, c, e) e na cana-energia (Figura 5b, d, f). A aplicação de Si tanto com e sem déficit hídrico, aumentou eficiência no uso de C e N da cana-de-açúcar (Figura 5a, c). No entanto, a eficiência de uso de P em cana-de-açúcar (Figura 5e) e eficiência de C, N e P em cana-energia, aumentou apenas em condição de déficit hídrico (Figura 5b, d, f).

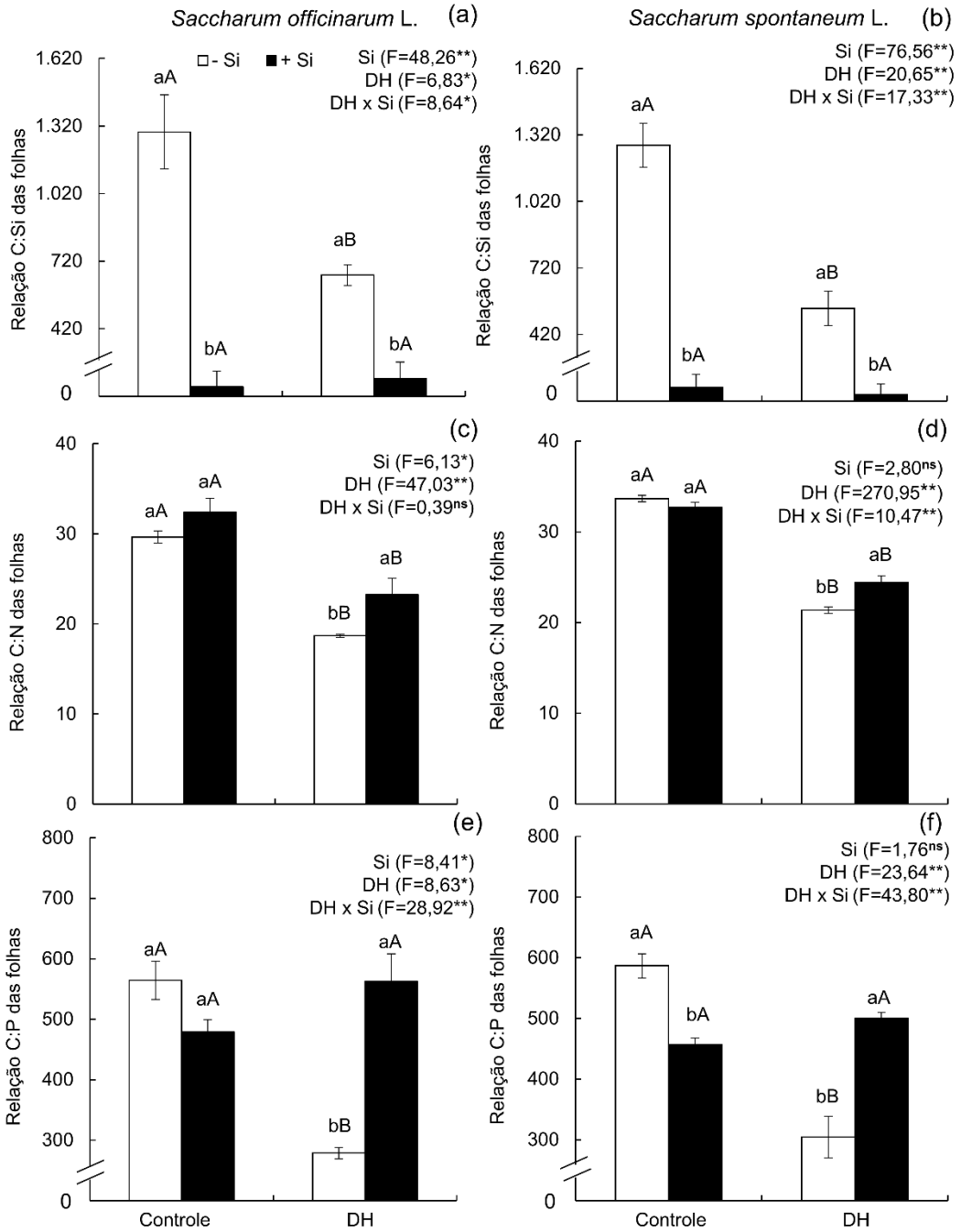

Figura 4. Relação C:Si (a, b), C:N (c, d) C:P (e, f) das folhas da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico- Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico- DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

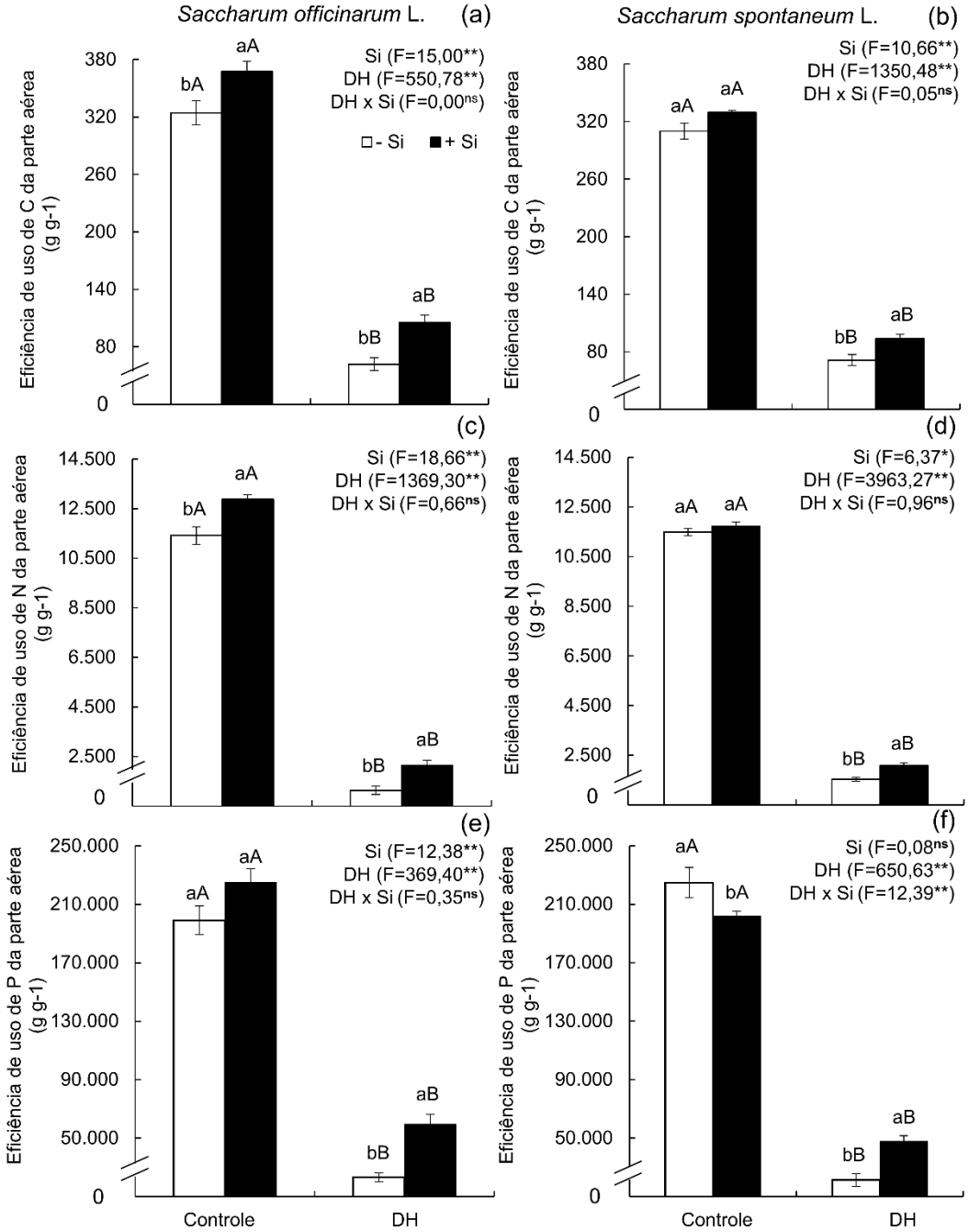

Figura 5. Eficiência no uso de C (a, b), eficiência no uso de N (c, d) e eficiência no uso de P (e, f) da parte aérea da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

4.3 A fertilização com Si aumenta o conteúdo relativo de água e o potencial hídrico foliar (Ψw), diminui o vazamento de eletrólitos e incrementa a eficiência quântica do PS II de plantas em condição de estresse hídrico.

O conteúdo relativo de água da folha diminuiu em plantas submetidas à condição de déficit hídrico sem a aplicação de Si, comparadas às plantas sem déficit hídrico na cana-de-açúcar (Figura 6a) e na cana-energia (Figura 6b). A aplicação de Si em cana-de-açúcar, independentemente condição hídrica, aumentou o conteúdo relativo de água das plantas (Figura 6a). No entanto, em cana-energia esse aumento ocorreu apenas sob déficit hídrico (Figura 6b).

Em cana-de-açúcar houve diminuição do potencial hídrico das plantas em condição de déficit quando comparadas as plantas sem limitação hídrica (Figura 6c). Em cana-energia o potencial hídrico diminuiu com o déficit hídrico apenas nas plantas sem a aplicação de Si (Figura 6d). Em condição de déficit hídrico, o fornecimento de Si manteve o potencial hídrico foliar maior quando comparado à condição de ausência do elemento em cana-de-açúcar (Figura 6c) e cana-energia (Figura 6d).

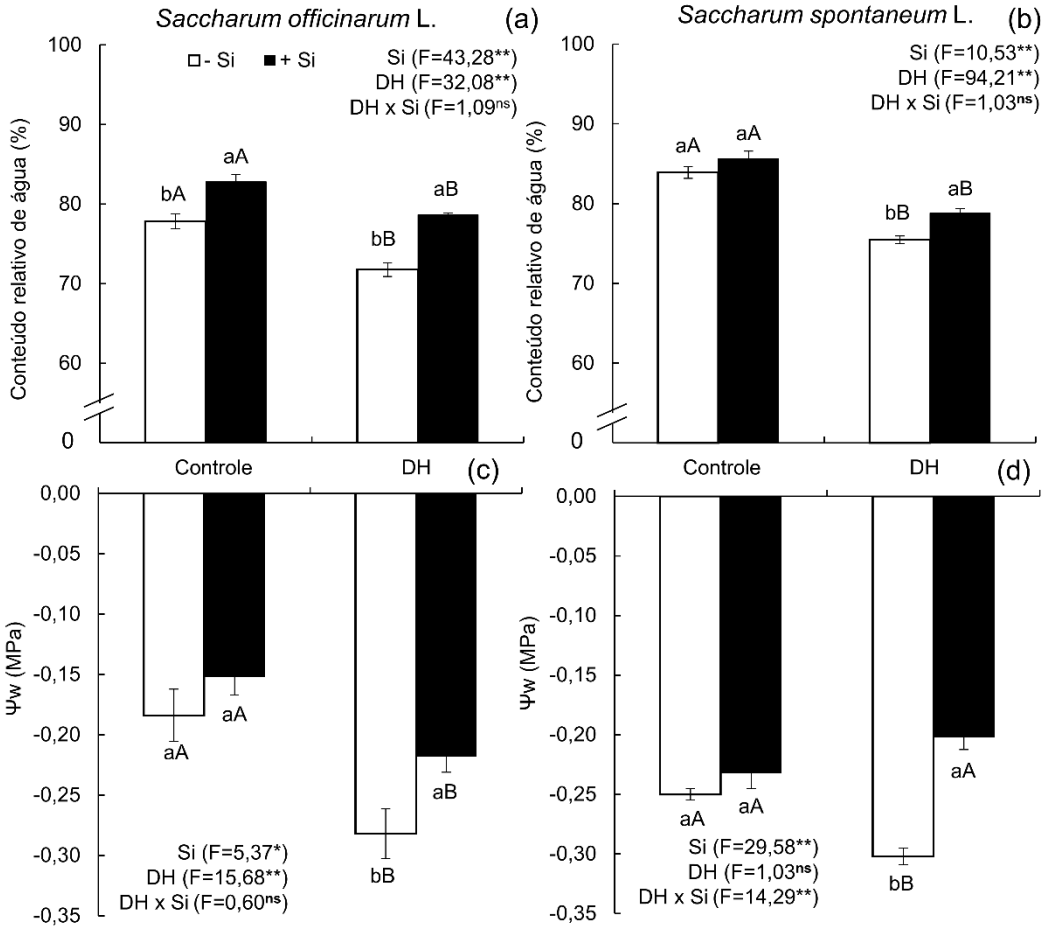

Figura 6. Conteúdo relativo de água (a, b) e potencial hídrico foliar (c, d) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

Nas plantas sob déficit hídrico sem Si, em relação as cultivadas sem o déficit, houve aumento do vazamento de eletrólitos celulares (Figura 7a, b) e diminuição na eficiência quântica do PS II (Figura 7c, d) em ambas as espécies. No entanto, a presença de Si nas plantas sob estresse hídrico diminuiu o vazamento de eletrólitos em cana-de-açúcar (Figura 7a) e em cana-energia (Figura 7b), e incrementou a eficiência quântica do PS II nas duas espécies de cana estudadas (Figura 7c, d).

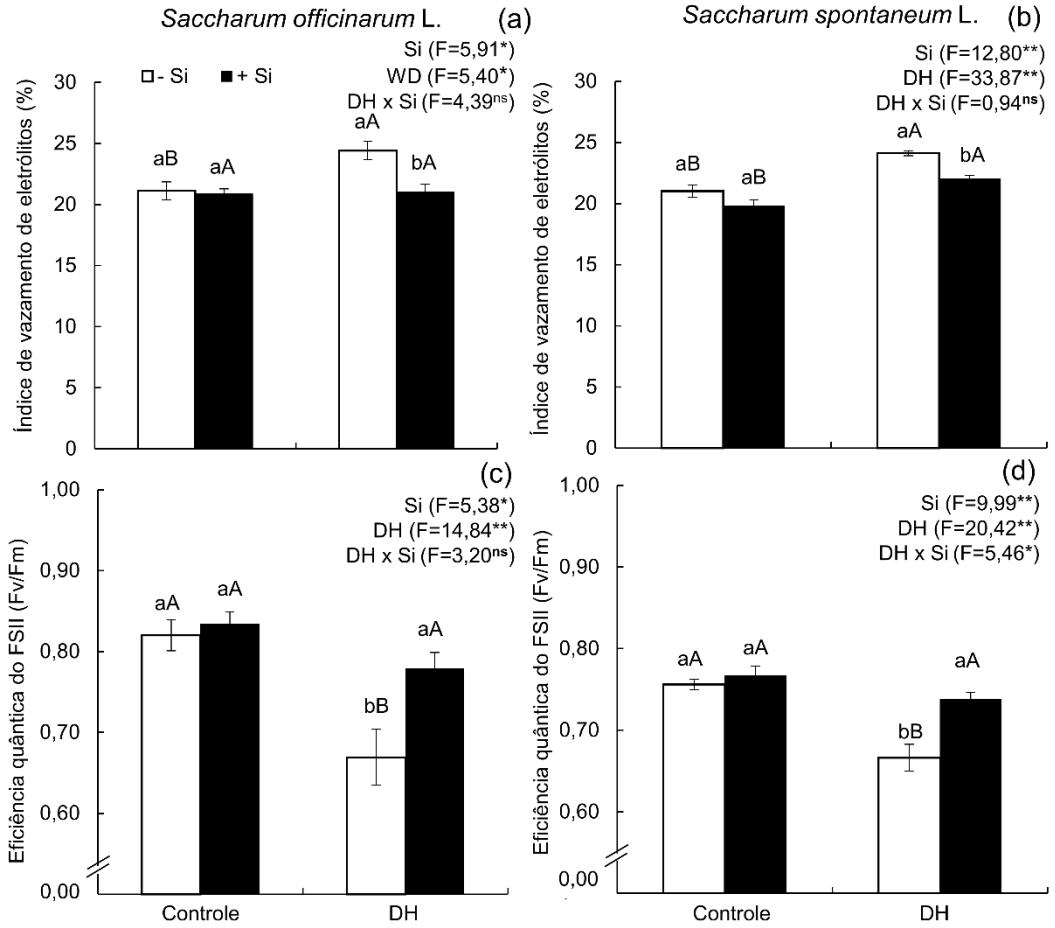

Figura 7. Índice de vazamento de eletrólitos celulares (a, b) e eficiência quântica do PS II (c, d) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

4.4 O Si auxilia no desenvolvimento da planta, aumentando o número de folhas e perfilhos, área foliar e produção de massa seca.

O número de folhas e perfilhos diminuíram com o déficit hídrico sem Si, quando comparados às plantas com disponibilidade adequada de água (Figura 8a, b, c, d). Nas plantas submetidas ou não ao déficit hídrico, o Si incrementou o número de folhas da cana-de-açúcar (Figura 8a), mas na cana-energia esse incremento foi observado somente em condição de déficit hídrico (Figura 8b). Para ambas as espécies, o

número de perfilhos aumentou com a aplicação de Si nas duas condições hídricas (Figura 8c, d).

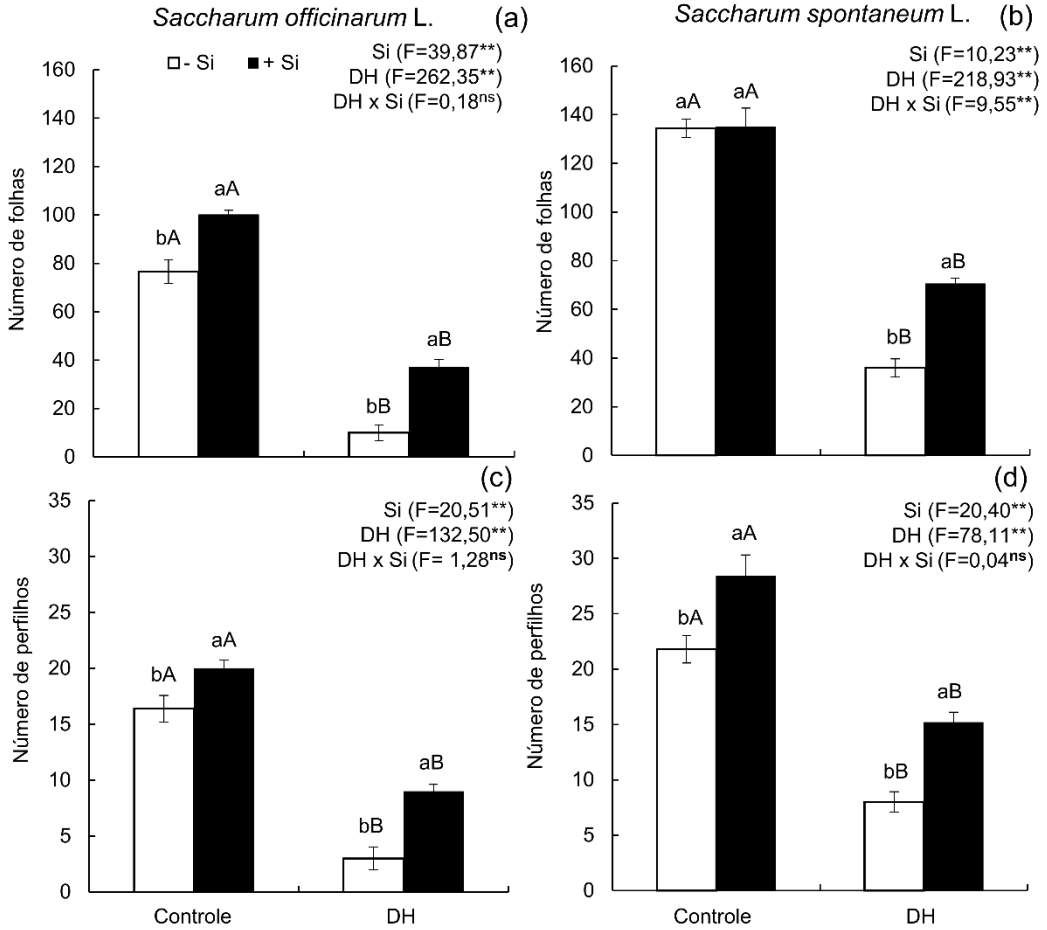

Figura 8. Número de folhas (a, b) e de perfilhos (c, d) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante com 1% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

As plantas que não receberam Si tiveram redução no número de folhas e perfilhos, bem como de matéria seca, em função da presença do déficit hídrico, sendo possível de ser observada visualmente no crescimento e desenvolvimento dessas plantas (Figura 9a, b).

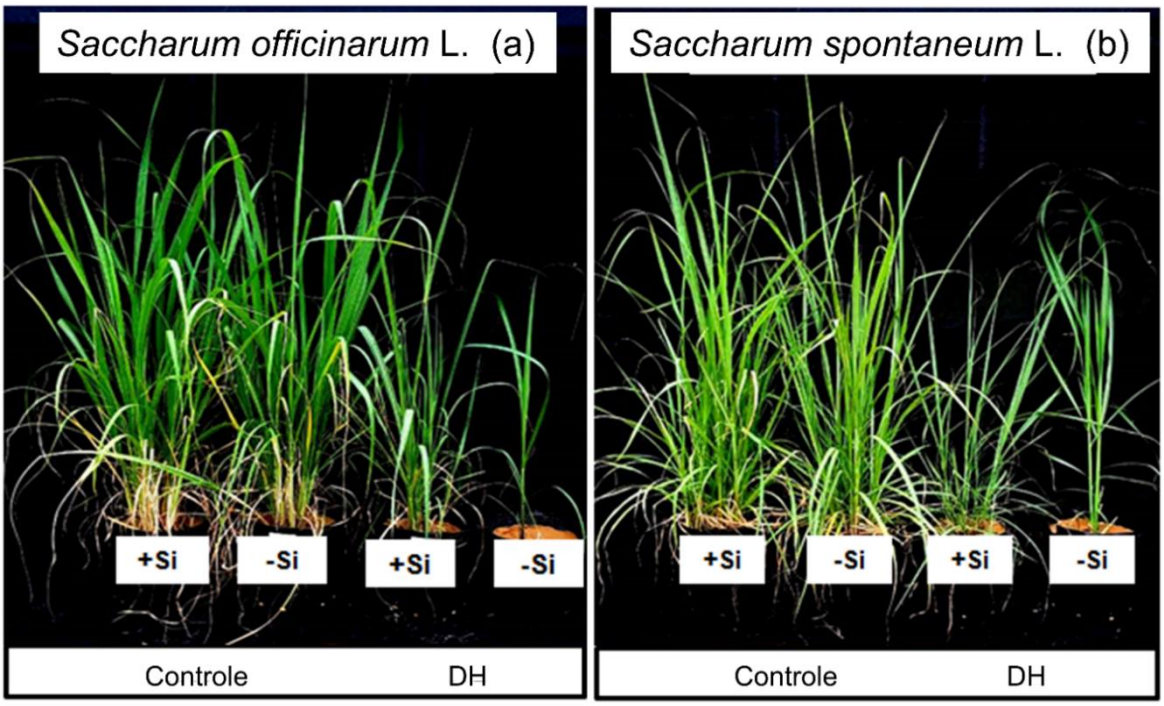

Figura 9. Efeito do fornecimento de Si no crescimento da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) (a) e cana-energia (*Saccharum spontaneum*) (b) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar.

A área foliar das plantas da cana-de-açúcar (Figura 10a) e da cana-energia (Figura 10b) diminuiu em plantas submetidas à condição de déficit hídrico sem Si, em relação às com disponibilidade hídrica adequada. A aplicação de Si em relação a sua ausência aumentou a área foliar da cana-de-açúcar apenas sob déficit hídrico (Figura 10a) e da cana-energia para duas condições hídricas (Figura 10b).

A matéria seca da parte aérea da touceira de cana-de-açúcar (Figura 10c) e da cana-energia (Figura 10d) diminuiu nas plantas sob déficit hídrico sem Si. No entanto, nas plantas sob déficit hídrico que recebeu Si, houve aumento da matéria seca da parte aérea da touceira para cana-de-açúcar (Figura 10c) e para cana-energia (Figura 10d). A matéria seca da raiz da touceira de cana-de-açúcar (Figura 10e) e da cana-energia (Figura 10f) diminuiu nas plantas em condições de déficit hídrico, no entanto a aplicação de silício tanto com e sem déficit hídrico não alterou a matéria seca da raiz da touceira de ambas as espécies (Figura 10e, f).

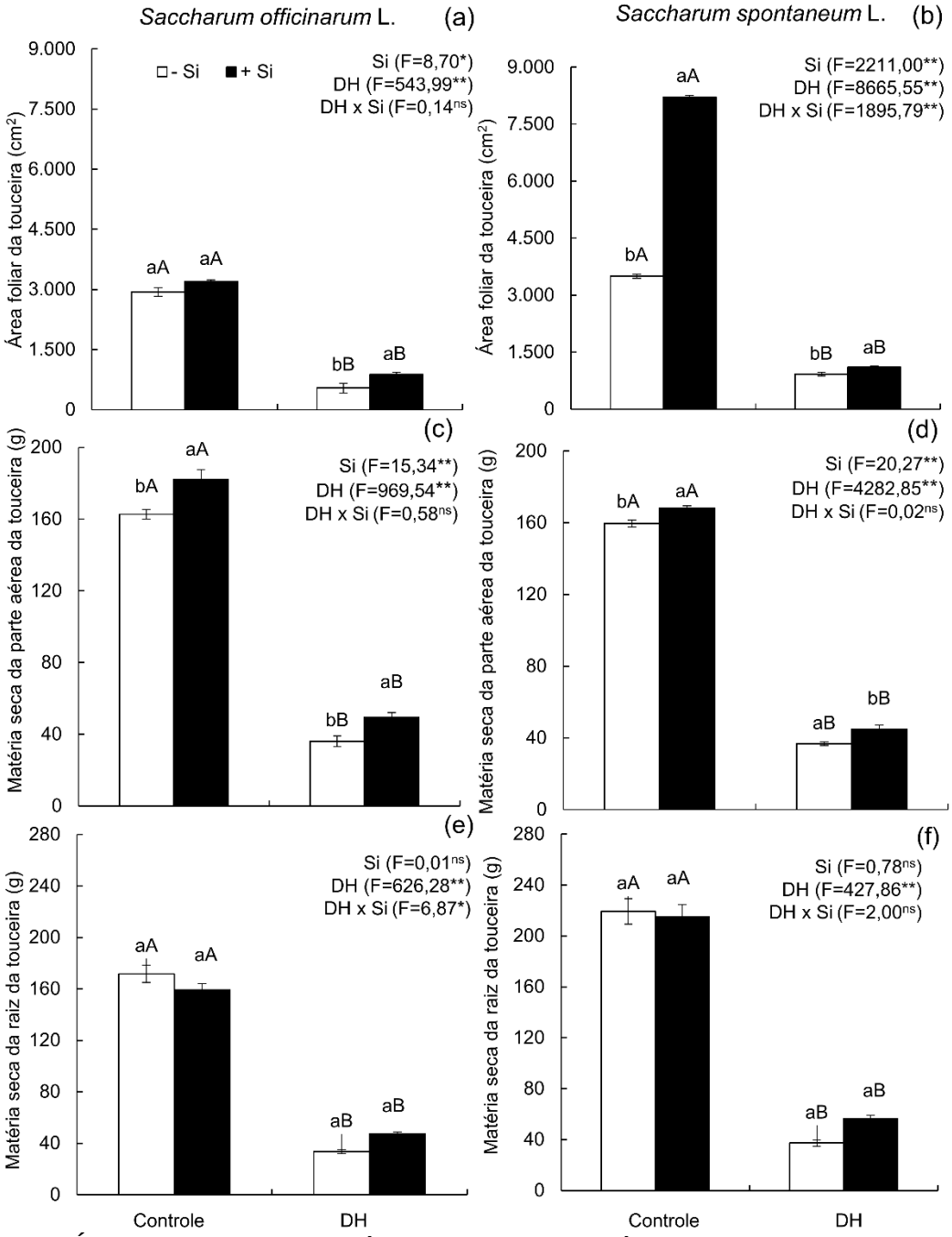

Figura 10. Área foliar (a, b) e matéria seca da parte aérea da touceira (c, d) e matéria seca da raiz da touceira (e, f) da soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (a, c, e) e cana-energia (*Saccharum spontaneum* L.) (b, d, f) cultivadas sem déficit hídrico-Controle (70% da capacidade de retenção de água no solo – CRAS) e com déficit hídrico-DH (30% da CRAS), sem (-Si) e com a aplicação de Si (+Si) via fertirrigação associada com pulverização foliar. ** e *: significante a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ^{ns}: não significativo para os efeitos principais e interação, pelo teste F. Letras minúsculas indicam diferenças em relação ao Si e letras maiúsculas em relação ao déficit hídrico pelo desdobramento da interação dos fatores. Barras representam o erro padrão da média. Si x DH: interação.

5 DISCUSSÃO

A absorção de Si pelas duas espécies de cana que receberam esse elemento benéfico foi diminuída com déficit hídrico (Figura 2), pois o contato íon-raiz depende do teor de água do solo para induzir o processo de fluxo de massa (Taiz et al., 2017). No entanto, esse efeito não ocorreu em plantas que não receberam Si onde a absorção deste elemento foi muito baixa (aproximadamente 20mg por planta), dado ao fato que o solo empregado, um Neossolo Quartzarênico, naturalmente tem baixo teor disponível deste elemento. Pois embora predomina-se areia constituída de SiO_2 mas sua forma cristalina não está na forma disponível para planta (de Oliveira et al., 2007).

As plantas sobre condição de déficit hídrico precisam se adaptar as condições do meio de resistir a baixa disponibilidade hídrica (Verslues et al., 2006), tendo diminuição do conteúdo relativo de água das folhas das duas espécies de cana com ou sem Si (Figura 6a, b). Forma semelhante ocorreu com o potencial de água nas folhas que foi diminuído pelo déficit hídrico (Figura 6c, d), fato constatado também por Marcos et al. (2018) em cana-de-açúcar.

Este cenário com baixo conteúdo de água na planta induz estresse oxidativo dado aumento de espécies reativas de oxigênio que degrada compostos orgânicos como os lipídeos das membranas causando efluxo do citosol (Barbosa et al., 2014). Isso induz o aumento do índice de vazamento de eletrólitos das células das folhas de ambas espécies de cana, especialmente sem aplicação de Si (Figura 7a, b). Estes efeitos do déficit hídrico também prejudicaram a eficiência do PS II das duas espécies estudadas (Figura 7c, d). A baixa eficiência do PS II nos tratamentos sem Si em condição de déficit hídrico, atingindo valores inferiores a 0,75 (Fv/Fm) indica perda de energia no aparelho fotossintético, sendo a faixa ideal de 0,75 (limite mínimo) e 0,85 (limite máximo) (Maxwell e Johnson, 2000).

O déficit hídrico em cana pode levar ao fechamento estomático induzindo condição de excesso de pressão energética no aparato fotoquímico que pode levar à fotoinibição (Sales et al., 2013). A fotoinibição ocorre quando a energia dos fótons excede a quantidade de energia usada pela fotossíntese aumentando potencialmente a quantidade de energia excessiva de fótons no PS II (Zhang et al., 2016). Estes danos

fisiológicos nas plantas de cana ficaram evidenciados pelo fato da ocorrência do déficit hídrico severo (30% da capacidade de retenção de água do solo) estudado.

Com esses prejuízos fisiológicos, o déficit hídrico prejudicou o crescimento das duas espécies tendo diminuição do número de folhas (Figura 8a, b), perfilhos (Figura 8c, d) e área foliar (Figura 10a, b) e consequentemente a produção de massa seca das plantas (Figura 10c, d). Salienta-se que a diminuição da área foliar é considerada como uma resposta à condição de limitação hídrica pois diminui a área de transpiração para evitar perda de água e também a interceptação dos raios solares para diminuir a pressão energética na eficiência quântica do PS II (Chaves et al., 2009).

Estes prejuízos do déficit hídrico no crescimento da cana-de-açúcar foram relatados por outros autores (Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020A; Verma et al., 2019) mas não tem estudos para cana-energia sendo o primeiro relato para essa espécie. Estes autores justificam a diminuição do crescimento da planta de cana-de-açúcar pelos danos ligados aos aspectos fisiológicos do déficit hídrico. No entanto, é possível que o déficit hídrico possa alterar a homeostase do C, N e P vitais para o crescimento da planta, mas isso ainda não foi relatado para essas espécies. Portanto, nosso estudo revelou que o déficit hídrico induz prejuízo na planta também devido as modificações estequiométricas C:Si, C:N e C:P que ocorreram nas duas espécies especialmente sem adição de Si no meio de cultivo (Figura 4). Portanto, evidenciamos que o déficit hídrico ao modificar as relações estequiométricas alterou a homeostase destes elementos nos tecidos das plantas e diminuiu a eficiência de uso dos nutrientes C, N e P (Figura 5). Gerloff e Gabelman (1983) acrescentam que as plantas em condições de déficit hídrico diminuem a redistribuição dos nutrientes e isso pode também prejudicar a eficiência de uso de nutrientes pela planta.

A nossa pesquisa evidencia que para o melhor entendimento dos efeitos do déficit hídrico no crescimento da cana, necessita-se que seja considerada a relação estequiométrica e os prejuízos na eficiência de utilização do C, N e P e não apenas os danos fisiológicos.

O efeito benéfico do Si na atenuação do déficit hídrico é notório nas duas espécies de cana. Observou-se claramente que a aplicação de Si nas duas espécies cultivadas sob déficit hídrico aumentou conteúdo de água na planta (Figura 6a, b)

resultado do maior potencial hídrico (Figura 6c, d). Estes efeitos possivelmente devem-se a diminuição da condutância estomática (Mata e Lamattina, 2001) e da transpiração (Pei et al., 2010). O aumento do conteúdo de água na planta de cana sob déficit hídrico devido a aplicação de Si também foi relatado por outros autores na cana-de-açúcar (Bezerra et al., 2019; Teixeira et al., 2020A), mas não há relatos na cana-energia deste efeito.

Diante disso, a fertilização com Si nas duas espécies foi eficaz na diminuição do estresse oxidativo pois houve menor índice de vazamento de eletrólitos celular (Figura 7a, b), possivelmente por incrementar a ação dos mecanismos de defesa antioxidante (Hernandez-Apaolaza, 2014) evitando a peroxidação de lipídeos da membrana que induz o vazamento celular (Noctor e Foyer, 1998). Um outro mecanismo que indica que o Si atenuou o estresse nas plantas sob déficit hídrico seria seu benefício no aumento da eficiência quantifica do PS II (Figura 7c, d). Este resultado indica o benefício do Si em manter a integridade do aparato fotossintético da planta sob estresse.

A diminuição dos danos causados pelo déficit hídrico com a aplicação de Si ficou muito evidenciado nas variáveis biométricas, promovendo aumento no número de folhas (Figura 8a, b), perfilhos (Figura 8c, d), área foliar (Figura 10a, b) e na massa seca das plantas das duas espécies (Figura 10c, d). Estes efeitos benéficos do Si no crescimento das plantas de cana-de-açúcar sob déficit hídrico foram verificados também em outros estudos realizados por de Camargo et al. (2019); Teixeira et al. (2020A); Verma et al. (2019).

Conforme visto e também salientado por diversos autores (Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020A; Verma et al., 2019), os mecanismos envolvidos para que o Si promova a atenuação do déficit hídrico em cana-de-açúcar estão relacionados a aspectos fisiológicos que resultam em melhoria do crescimento da planta. No entanto, é conhecido que as plantas sob estresse têm estratégias para promover nova homeostase estequiométrica para equilibrar seu metabolismo atenuando a restrição ambiental (Prado e Silva, 2017). Neste sentido, verificou-se que a aplicação de Si nas duas espécies estudadas sob déficit hídrico modificou a estequiometria do Si:C:N:P, diminuindo a relação C:Si (Figura 4a, b) e incrementando as relações C:N e C:P (Figura 4c, d, e, f).

A diminuição da relação C:Si deve-se aumento do conteúdo de Si devido (Figura 3a, b) a sua aplicação nos tecidos foliares das plantas estudadas. A diminuição relativa da eficiência de uso de C nos tecidos foliares deve-se ao fato de que parte deste C pode ser substituído por Si devido ao baixo custo de energia durante sua incorporação no tecido da planta, em relação aos compostos orgânicos (Cooke e Leishman, 2012; Schaller et al., 2012A). Observou-se que o Si diminuiu teores de celulose e também de C em plantas de *Phragmites australis* Trin (Schaller et al., 2012B). Portanto, em condição de déficit hídrico, essas modificações estequiométricas promovidas pelo Si tiveram benefícios no metabolismo da planta para C e subsequentemente no N e P e isso ficou comprovado pelo aumento da eficiência de uso do C, N e P pelas duas espécies avaliadas (Figura 5). A maior relação C:N e a maior eficiência de uso de N sé dá pelo maior teor de N dos tecidos (Figura 3c, d). Enquanto a maior eficiência de P ocorre pela maior matéria seca observada em plantas fertilizadas com silício (Figura 10c, d). Cabe destacar outro aspecto que indica que o aumento da eficiência do uso do C pode ter recebido contribuição do efeito do Si visto no aumento da relação Fv/Fm, pois ela revela o nível energético de excitação dos pigmentos que dirigem a fotossíntese; então, a habilidade em manter elevadas razões Fv/Fm sob estresse hídrico pode ser um indicativo de eficiência no uso da radiação pela fotoquímica e, consequentemente, a assimilação de C (Tester e Bacic, 2005).

Portanto, pela primeira vez é evidenciado que as plantas sob déficit hídrico utilizam o Si como estratégia para promover as modificações estequiométricas importantes e garantir homeostase suficiente para aumentar eficiência de utilização de nutrientes vitais para seu metabolismo explicando o incremento do crescimento das duas espécies estudadas.

Observa-se ainda que mesmo em condições adequadas de água no solo houve efeito benéfico do Si em algumas variáveis principalmente na cana-de-açúcar em relação a cana-energia, mas não foram importantes agronomicamente pois não afetaram a produção de massa da planta. Isso indica que o Si é mais importante em plantas cultivadas sob estresse do que sem estresse fato amplamente relatado na literatura (Bezerra et al., 2019; de Camargo et al., 2019, 2017; Pei et al., 2010; Youssef Rouphael et al., 2012).

6 CONCLUSÕES

O fornecimento de Si via fertirrigação associado com pulverização foliar de Si solúvel incrementou absorção deste elemento na soqueira da cana-de-açúcar e da cana-energia cultivada com ou sem déficit hídrico.

O silício atenuou os efeitos causados pelo déficit hídrico severo dado aumento do conteúdo relativo de água e do potencial hídrico diminuindo estresse oxidativo refletindo na eficiência da fotossíntese e também por modificar a estequiométrica C:N:P aumentando a eficiência de uso destes nutrientes e o crescimento das duas espécies estudadas.

7 REFERÊNCIAS

Alves BA (2014). **Desempenho agronômico e produtividade de soqueira de cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de água e nitrogênio**. 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias - Agronomia) –IF GOIANO, Rio Verde.

Amin M, Ahmad R, Basra SMA., Murtaza G (2014) Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea mays* L.) under water déficit. **Pakistan Journal of Agricultural Science** 51:187-196.

Babiker AGT, Duncan HJ (1974) Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. **Weed Research**,14:375-378.

Barbosa JC, Maldonado Júnior W (2015) **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp.

Barbosa MR, Silva MMA, Willadino L, Ulisses C, Camara TR (2014) Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural** 44:453–460.

Barrs HD, Weatherley PE (1962) A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian Journal of Biological Sciences** 15:413–428.

Basnayake L, Jackson PA., Inman-Mabber NG, Lakshmanan P (2012) Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation methylation and chromatin patterning in cane yield and sugar content in response to water stress. **Journal of Experimental Botany** 63:6023–6033.

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani PR, Gallo JR (1983) Métodos de análise química de plantas.

Bernardo S. Manejo da irrigação na cana-de-açúcar (2006) Alcoolbrás, São Paulo, n.106, p.72-80.

Besharat S, Barão L, Cruz C (2020) New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**. 263:110398.

Bezerra BKL, Lima GPP, dos Reis AR, Silva MA, de Camargo MS (2019) Physiological and biochemical impacts of silicon against water deficit in sugarcane. **Acta Physiologiae Plantarum** 41: 1–12.

Birchall JD (1995) The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews**, 24:351-357.

Bista DR, Heckathorn SA, Jayawardena DM, Mishra S, Boldt JK (2018) Effects of drought on nutrient uptake and the levels of nutrient-uptake proteins in roots of drought-sensitive and-tolerant grasses. **Plants** *7*:28.

Bokhtiar SM, Huang HR, Li YR, Dalvi VA (2012) Effects of silicon on yield contributing parameters and its accumulation in abaxial epidermis of sugarcane leaf blades using energy dispersive x-ray analysis. **Journal of Plant Nutrition** 35:1255-1275.

Bukhari MA, Ashraf MY, Ahmad R, Waraich EA, Hameed M (2015) Improving drought tolerance potential in wheat (*Triticum aestivum* L.) through exogenous silicon supply. **Pakistan Journal of Botany** *47*:1641-1648.

Carneiro LF, Oliveira RAD, Weber H, Daros E, Berton GS, Rodrigues FV (2020) Alternative sugarcane production for conservation of sandy soils: sugarcane straw, intercropping and nitrogen**. Ciência e Agrotecnologia** 44:1-9.

Chaves MM, Flexas J, Pinheiro C (2009) Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany.** 103:551–560.

CONAB. Acompanhamento de safra brasileira de cana-de-açúcar, v.6 – Safra 2019/20, n.4 - Quarto levantamento, Brasília p.1-62, abril/2020.

Cooke J, Leishman MR (2012) Tradeoffs between foliar silicon and carbon-based defences: Evidence from vegetation communities of contrasting soil types. **Oikos** 121:2052–2060.

de Camargo MS, Bezerra BKL, Holanda LA, Oliveira AL, Vitti AC, Silva MA (2019) Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19:81–91.

de Camargo MS, Bezerra BKL, Vitti AC, Silva MA, Oliveira AL (2017) Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 17:99–111.

de Oliveira LA, Korndörfer GH, Pereira AC (2007) Acumulação de silício em arroz em diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 31: 685–690.

Dias FLF, Mazza JA, Matsuoka S, Perecin D, Maule RF (1999) Produtividade da canade-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** 23:627-634.

Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science.** 135:1–9.

Epstein E. Silicon: its manifold roles in plants (2009) **Annals of Applied Biology**, 155:155-160.

Farooq MA, Dietz KJ (2015) Silicon as versatile player in plant and human biology: overlooked and poorly understood. **Frontiers in Plant Science**, v.6, art.994.

Farouk S, Elhindi KM, Alotaibi MA (2020) Silicon supplementation mitigates salinity stress on Ocimum basilicum L. via improving water balance, ion homeostasis, and antioxidant defense system. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 206:111396.

Gerloff G, Gabelman W (1983) Genetics basis of inorganic pant nutrition, in: Springer-Verlag (Ed.), Inorganic Plant Nutrition.

Gong, H., Zhu, X., Chen, K., Wang, S., Zhang, C. 2005. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v.169, p.313-321.

Gottardi S, Lacuzzo F, Tomasi N, Cortella G, Manzocco L, Pinton RV, Mimmo T, Scampicchio M, Costa LD, Cesco S (2012) Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 56:14-23.

Govindaraj P, Amalraj VA, Mohanraj K, Nair NV (2014) Collection, Characterization and Phenotypic Diversity of *Saccharum spontaneum* L. from Arid and Semi Arid Zones of Northwestern India **Sugar Tech** 16:36–43.

Hamdy AE, Khalifa SM, Shawer SS, Mancy AAG (2016) Effect of Water Stress on the Growth, Nutritional and Biochemical Status of Two Varieties of Pomegranate Seedlings. **Journal of Plant Production**, *7*:1321-1329.

Hattori T, Inanaga S, Araki H, Na P, Morita S, Luxová M, Lux A (2005) Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor.* **Physiologia Plantarum** 123:459–466.

Hernandez-Apaolaza L (2014) Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? a review. **Planta**. 240:447–458.

Hoang DT, Hiroo T, Yoshinobu K (2019) Nitrogen use efficiency and drought tolerant ability of various sugarcane varieties under drought stress at early growth stage. **Plant Production Science** 22:250–261.

Kim Yoon-Há, Khan AL, Waqas M, Lee In-Jung (2017) Silicon regulates antioxidante activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science** 8:1-7.

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (2004) Análise de silício no solo, planta e fertilizante.

Kostic L, Nikolic N, Bosnic D, Samardzic J, Nikolic M (2017) Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant and Soil,** 419:447-455.

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075–2085.

Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 67:4113–4121.

Lahive F, Hadley P, Daymond AJ (2018) The impact of elevated CO_2 and water deficit stress on growth and photosynthesis of juvenile cacao (*Theobroma cacao* L.). **Photosynthetica** 56:911–920.

Leal MRLV, Walter AS, Seabra JEA (2013) Sugarcane as an energy source. **Biomass Conversion and Biorefinery** 3:17–26.

Li YP, Ye W, Wang M, Yan XD (2009) Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts. **Climate Research** 39:31–46.

Long M, Guo L, Li J, Yu C, Hu T, Yue J, He S (2018) Effects of water and exogenous Si on element concentrations and ecological stoichiometry of plantain (*Plantago lanceolata* L.). **Journal of Plant Nutrition** 41:1263–1275.

Ma JF, Yamaji N, Mitani-ueno N (2011) Transport of silicon from roots to panicles in plants. **The Japan Academy** 87:377–385.

Mackay AD, Barber SA (1985) Soil moisture effects on root growth and phosphorus uptake by corn. **Agronomy Journal** 77:519- 523.

Manhães CMC, Garcia RF, Francelino FMA, Francelino HO, Coelho FC (2015) Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. **Revista Vértices** 17:163–181.

Marchiori PER, Machado EC, Sales CRG, Espinoza-Núñez, E, Magalhães Filho, JR, Souza GM, Pires RCM, Ribeiro RV (2017) Physiological plasticity is important for maintaining sugarcane growth under water deficit. **Frontiers in Plant Science** 8:1–12.

Marcos FCC, Silveira NM, Mokochinski JB, Sawaya ACHF, Marchiori PER, Machado EC, Souza GM, Landell MGA, Ribeiro RV (2018) Drought tolerance of sugarcane is improved by previous exposure to water deficit. **Journal of Plant Physiology** 223: 9–18.

Mata CG, Lamattina L (2001) Nitric oxide induces stomatal closure and enhances the adaptive plant responses against drought stress. **Plant Physiology** 126:1196-1204.

Matsuoka S, Garcia AAF, Arizono H (2005) Melhoramento de cana-de-açúcar. In: BORÉM, A. (ed.) Melhoramento de espécies cultivadas. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa: Editora da UFV, v.1, p.205-251.

Matsuoka S, Kennedy AJ, Santos EGDD, Tomazela AL, Rubio LCS (2014) Energy Cane: Its Concept, Development, Characteristics, and Prospects. **Advances in Botany** 1-13.

Maxwell K, Johnson GN (2000) Chlorophyll fluorescence - A practical guide. **Journal of Experiemental Botany** 51:659–668.

McKeague JA, Cline MG (1963) Silica in the soil. **Advances in Agronomy**, 15:339–396.

Ming DF, Pei ZF, Naeem MS, Gong HJ, Zhou WJ (2012) Silicon alleviates PEG-induced water-deficit stress in upland rice seedlings by enhancing osmotic adjustment. **Journal of Agronomy and Crops Science** 198:14-26.

Ming R, Moore PH, Wu KK, D Hont A, Glaszmann JC, Tew TL, Schnell RJ (2006) Sugarcane Improvement through Breeding and Biotechnology. **Plant Breeding Reviews** 27:1-15.

Mitani N, Yamaji N, Ma JF (2008) Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology** 50:5-12.

Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C: N: P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports**, 7:1-8.

Niu D, Zhang C, Ma P, Fu H, Elser JJ (2019) Responses of leaf C: N: P stoichiometry to water supply in the desert shrub *Zygophyllum xanthoxylum*. **Plant Biology** *21*:82-88.

Noctor G, Foyer CH (1998) Ascorbate and glutathione: Keeping active oxygen under control. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**. 49:249–279.

Oliveira R, Prado R, Felisberto G, Cruz F (2019) Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19: 948–953.

Othmani A, Ayed S, Bezzin O, Farooq M, Ayed-Slama O, Slim-Amara H, Younes MB (2020) Effect of Silicon Supply Methods on Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.) Response to Drought Stress. **Silicon** 10:1-11.

Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou WJ (2010) Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation** 29:106–115.

Prado RM, Silva GP (2017) Ecological Response to Global Change: Changes in C:N:P Stoichiometry in environmental adaptations of plants, plant ecology - traditional approaches to recent trends. Plant Ecology - Traditional Approaches to Recent Trends. Zubaida Yousaf, IntechOpen.

Prado RM (2021) Mineral nutrition of tropical plants. Switzerland, Springer Nature, 392p.

Quintana KA, Zanini JR, Silva ER (2012) Irrigação e fertirrigação por exame em cana-de-açúcar na presença e ausência de boro. **Científica** 40:103-116.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.

Raven JA (1983) The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews** 58: 179–20.

Reichert JM, Albuquerque JA, Peraza JES, da Costa A (2020) Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional** 21:1-12.

Sales CRG, Ribeiro RV, Silveira JAG, Machado EC, Martins MO, Lagôa AMMA, (2013) Superoxide dismutase and ascorbate peroxidase improve the recovery of photosynthesis in sugarcane plants subjected to water deficit and low substrate temperature. **Plant Physiology and Biochemistry** 73:326–336.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho M, et al. Brazilian Soil Classification System. 2ª. Brasília: **Embrapa Soils**; 2018.

Santos LCN, Teixeira GCM, Prado RM, Rocha AMS, Pinto RCS (2020) Response of pre-sprouted sugarcane seedlings to foliar spraying of potassium silicate, sodium and potassium silicate, nanosilica and monosilicic acid. **Sugar Tech** 1:1–9.

Schaller J, Brackhage C, Dudel EG (2012A) Silicon availability changes structural carbon ratio and phenol content of grasses. **Environmental and Experimental Botany**. 77, 283–287.

Schaller J, Brackhage C, Gessner MO, Bäuker E,Dudel EG (2012B) Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. **Plant Biology** 14:392–396.

Segato SV, Pinto AS, Jendiroba E, Nóbrega JCM (2006) Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 415p.

Siddiqi MY, Glass ADM (1981) Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition** 4:289–302.

Silva JA (2017) The Importance of the Wild Cane *Saccharum spontaneum* for Bioenergy Genetic Breeding **Sugar Tech** 19:229-240.

Silva JAGD, Costa PMDA, Marconi TG, Barreto EJDS, Solís-Gracia N, Park JW, Glynn NC (2018) Agronomic and molecular characterization of wild germplasm *Saccharum spontaneum* for sugarcane and energycane breeding purposes. **Scientia Agricola** 75:329-338.

Souza JLMD, Gerstemberger E, Gurski BC, Oliveira RAD (2015) Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 45:426-433.

Taiz L, Zeiger E, Moller I, Murphy A (2017) Fisiologia vegetal 6° edição.

Teixeira GCM, Prado RDM, Rocha AMS, Piccolo MDC (2020B) 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** 15:1-10.

Teixeira GCM, Prado RDM, Rocha AMS, Santos LCN, Santos Sarah MM, Gratão PL, Fernandes C (2020A) Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 1:1–11.

Tejera NA, Rodés R, Ortega E, Campos R, Lluch C (2007) Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars **Field Crops Research**, 102: 64 - 72.

Tester M, Bacic A (2005) Abiotic stress tolerance in grasses. from model plants to crop plants. **Plant Physiology** 137:791–793.

Tew TL, Cobill RM (2008) Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. In: W Vermerris (ed) **Genetic Improvement of Bioenergy Crops** 249:272.

Turner NC (1981) Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and Soil** 58:339–366.

Verma KK, Liu XH, Wu KC, Singh RK, Song QQ, Malviya MK, Song XP, Singh P, Verma CL, Li YR (2019) The Impact of Silicon on Photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon** 2:1355–1367.

Verslues PE, Agarwal M, Katiyar-Agarwal S, Zhu J, Zhu JK (2006) Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal** 45:523–539.

Verslues PE, Agarwal M, Katiyar-Agarwal S, Zhu J, Zhu JK (2006) Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **Plant Journal** 45:523–539.

Viciedo DO, Prado RM, Martínez CA, Habermann E, Piccolo MC (2019) Short-term warming and water stress affect *Panicum maximum* Jacq. stoichiometric homeostasis and biomass production. **Science of The Total Environment** 681:267-274.

Viciedo DO, Prado, RM, Martinez CA, Habermann E, Piccolo MC, Hurtado AC, Barreto RF, Calzada CP (2021). Changes in soil water availability and air-temperature impact biomass allocation and C: N: P stoichiometry in different organs of *Stylosanthes capitata* Vogel. **Journal of Environmental Management** 278:111540.

Youssef Rouphael, Cardarelli M, Schwarz D, Franken P, Colla G (2012) Effects of drought on nutrient uptake and assimilation in vegetable crops, plant responses to drought stress: from morphological to molecular features. Plant Responses to Drought Stress. p.171-195.

Zanão Júnior LA, Fontes RLF, Avila VT (2009) Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 44:203-206.

Zhang C, Zhan DX, Luo HH, Zhang YL, Zhang WF (2016) Photorespiration and photoinhibition in the bracts of cotton under water stress. **Photosynthetica** 54:12–18.