

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO ALIVIA OS ESTRESSES
OCASIONADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO EM PLANTAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS EM DIFERENTES SOLOS**

Marcilene Machado dos Santos Sarah
Engenheira Agrônoma

2022

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO ALIVIA OS ESTRESSES
OCASIONADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO EM PLANTAS DE
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS EM DIFERENTES SOLOS**

Marcilene Machado dos Santos Sarah

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Coorientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

S243s

Sarah, Marcilene Machado dos Santos

Silício via fertirrigação alivia os estresses ocasionados pelo déficit hídrico em plantas de cana-de-açúcar cultivadas em diferentes solos / Marcilene Machado dos Santos Sarah. -- Jaboticabal, 2022

116 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Luiz Fabiano Palaretti

Coorientador: Renato de Mello Prado

1. Nutrição de plantas. 2. Elemento benéfico. 3. Saccharum officinarum. 4. Restrição hídrica. 5. Solos. 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.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

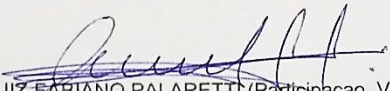
TÍTULO DA TESE: SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO ALÍVIA OS ESTRESSES OCASIONADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS EM DIFERENTES SOLOS

AUTORA: MARCILENE MACHADO DOS SANTOS SARAH

ORIENTADOR: LUIZ FABIANO PALARETTI

COORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

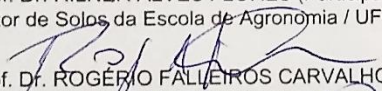
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

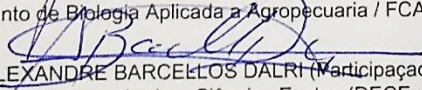

Prof. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas DECEX / FCAVUNESP JaboticabalSP

Prof. Dr. RILNER ALVES FLORES (Participação Virtual)
Setor de Solos da Escola de Agronomia / UFG - Universidade Federal de Goiás

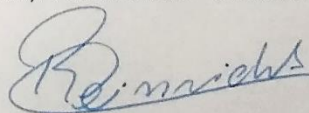
RILNER ALVES
FLORES:00260506176
06176

Assinado de forma digital
por RILNER ALVES
FLORES:00260506176
Dados: 2022.06.25 08:39:06
+03'00'


Prof. Dr. ROGÉRIO FALCÃO CARVALHO (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAVUnesp JaboticabalSP


Prof. Dr. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. REGES HEINRICHS (Participação Virtual)
FCATUNESP / DracenaSP



Jaboticabal, 21 de junho de 2022

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Marcilene Machado dos Santos Sarah, nascida em Belém– PA, Brasil, em 18 de março de 1993, filha de Valquíria Machado dos Santos e Alex Carvalho Sarah. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, no Câmpus de Belém (2016). Em 2012, durante a graduação, fez parte da Empresa Júnior de Agronomia-ECONAGRA Jr., e no mesmo ano foi admitida como bolsista do laboratório de fitopatologia na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-EMBRAPA, onde trabalhou com fungos patogênicos na cultura do açaizeiro. Em 2013, foi aprovada no processo seletivo do Programa de Educação Tutorial em Ciência do Solo - PET Solos, no qual foi bolsista durante três anos, desenvolvendo trabalhos na área de ciência do solo e educação ambiental. Em 2015, foi uma das fundadoras do Grupo de Estudos em Nutrição da Palma de Óleo- NUTRIPALMA/UFRA, que tem como finalidade desenvolver e difundir o conhecimento técnico científico sobre a cultura da palma de óleo no estado do Pará. Em 2016, foi admitida para o curso de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, e integrante do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP (GENPLANT), onde desenvolveu pesquisas na área de nutrição de plantas, especialmente sobre adubação silicatada em grandes culturas. Em 2018, deu início ao doutorado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) na mesma instituição, como bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, sendo integrante do Grupo de Pesquisas em Irrigação e Meio Ambiente (GPIMA), desenvolvendo pesquisas na área de irrigação, fertirrigação e nutrição de plantas, especialmente sobre o manejo hídrico e adubação silicatada na cana-de-açúcar. Ao longo do doutorado, no ano de 2019, deu início as atividades como representante discente titular no conselho do Programa de Agronomia (Ciência do Solo), permanecendo como atuante até 2022.

“Antes que a Alma possa ver, deve ser conseguida a harmonia interior, e os olhos da carne tornados cegos a toda a ilusão.

Antes que a Alma possa ouvir, a imagem (o homem) tem de se tornar surda aos rugidos como aos segredos, aos gritos dos elefantes em fúria como ao sussurro prateado do pirilampo de ouro.

Antes que a Alma possa compreender e recordar, ela deve primeiro unir-se ao Falador Silencioso, como a forma que é dada ao barro se uniu primeiro ao espírito do escultor.

Porque então a Alma ouvirá e poderá recordar-se.”

(A voz do Silêncio – Helena Petrovna Blavatsky)

Dedico este trabalho a Deus, à minha querida e amada mãe, Valquíria Santos, e a minha vizinha Otamires Coelho (*In memoriam*), por sempre me apoiarem e acreditarem em mim. Dedico também a todos os amigos que tornaram essa jornada mais leve. Obrigada!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por toda força que me concedeu nos momentos de dificuldades ao longo dessa caminhada.

À minha mãe querida e professora, Valquíria Machado dos Santos, que apesar das batalhas pessoais e familiares, nunca deixou de investir e incentivar os meus estudos. Além disso, sempre acreditou em mim e esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis da minha jornada acadêmica, rezando, apoiando e me acolhendo quando eu sempre precisei.

Ao meu pai e madrastra, Alex Sarah e a Ariadne Sarah, e aos meus irmãos Ramon Sarah e Alexia Sarah por me apoiarem e se orgulharem de mim.

Ao meu orientador, Dr. Luiz Fabiano Palaretti, pelos ensinamentos, pela confiança depositada em mim, pela disponibilidade de sempre me atender, ajudar e sanar minhas dúvidas, e por todo apoio nas atividades práticas dos nossos experimentos. E acima disso, por ter sido um grande amigo, me tratando como igual, e por sempre ter me aconselhando da melhor forma, tornando a minha jornada no doutorado mais tranquila. É admirável ver sua fibra, empatia com o próximo, sua ética, dedicação pelo trabalho e sua luta pelo que é certo. Os bons momentos compartilhados sempre serão lembrados por mim.

Ao meu orientador do mestrado e coorientador no doutorado, Dr. Renato de Mello Prado, pela orientação, disponibilidade, aos conselhos dados, por ter insistido e confiado em mim como orientada. Aprendi muito com seus ensinamentos, e não consigo mensurar o quanto cresci profissionalmente nesses seis anos nos quais pudemos trabalhar juntos. Agradeço a oportunidade de ter sua orientação, no qual eu aprendi a sempre buscar a excelência nas atividades desempenhadas.

Sempre falo e falarei com muito orgulho dos maravilhosos orientadores que tive na pós-graduação. Me sinto muito honrada por ter sido lapidada por dois grandíssimos e renomados pesquisadores. Ao longo de minha jornada pessoal, procurarei compartilhar todos os ensinamentos que obtive junto a eles, e nunca me esquecerei de todo trabalho desempenhado para o meu crescimento profissional. Por fim, só tenho a agradecer a ambos.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade, e por ter me acolhido durante o mestrado e doutorado, me propiciando crescimento profissional, além das experiências e oportunidades inesquecíveis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pelas oportunidades concedidas quanto a realização do curso de mestrado e doutorado, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelas bolsas concedidas. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao conselho do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), do qual fui representante discente durante três anos, ao lado de grandes mestres como os professores José Marques Júnior, Rogério Farias e Newton La Scala Júnior.

A banca avaliadora da qualificação: Dr. Rafael Barreto e Dr. Fábio Nóbile, e a banca de defesa, Dr. Rilner Alves Flores, Dr. Rogério Falleiros Carvalho, Dr. Alexandre Barcellos Dalri e Dr. Reges Heinrichs, pela disponibilidade e contribuições em minha pesquisa.

Aos melhores amigos que essa vida me deu, Gabriela Abbud, Mitri Hage, Luiz Danin e Fernando Moraes, por estarem presentes nos momentos mais importantes da minha vida, e que apesar da distância, nunca deixaram de se fazer presentes, torcendo por mim, e mandando energias positivas a cada conquista minha.

À Lana, minha grande amiga, por tornar meus dias mais felizes e por sempre estar ao meu lado em todos os momentos importantes.

Aos amigos e parceiros de trabalho, João Carlos Duarte e Heitor Hossetti, por terem sido meu braço direito ao longo do doutorado, me ajudando tanto na condução dos experimentos como nas análises laboratoriais.

Aos amigos, Kleve Canteral, Vanessa Pedrosa, Eduarda Reis, Thayane Leonel, Mariana Bomfim, Clebson Lúcio Barbosa, Carlos Alberto da Silva, Kássia Ferreira, Igor Cristian, Gelza Teixeira e Jardel Barbosa pelo apoio, ajuda, amizade e carinho cultivados ao longo de nossa estadia em Jaboticabal.

Aos amigos que a UNESP me concedeu: Jonathan Viana, Michael Bentino, José de Arruda, Ancelmo Cazuza, Antônio Márcio, Jonas Souza, Rafael Barreto,

Kamilla Oliveira, Bruno Sousa, Milton Costa, Elizabeth, Sabrina Nascimento, Gustavo Moura, Patric Alves, Gustavo André, Camila Vieira e Kamila Meneses, pela amizade, bons momentos vividos e conhecimentos compartilhados.

À técnica de laboratório de solos e adubos, Cláudia Dela Marta, à técnica do laboratório de fisiologia vegetal, Sônia Carregari, e ao Seu Luiz Cláudio por todo apoio, paciência e ensinamentos transmitidos durante a condução dos meus experimentos e das minhas análises.

Aos professores Luiz Fabiano Palaretti, Alexandre Barcellos Dalri, Renato Zanini, José Marques Júnior, Carlos Azania, Rinaldo de Paula, Rogério Falleiros, Renato Prado, Arthur Bernardes, Mara Cruz, Priscila Gratão, Pedro Alves, que proporcionaram o enriquecimento dos meus conhecimentos ao longo das disciplinas cursadas no mestrado e doutorado.

Aos meus eternos orientadores, Mário Lopes e Ana Regina, por terem sido a base do meu crescimento científico e profissional, pelo qual eu serei eternamente grata.

Ao Programa de Educação Tutorial em Ciência do Solo, que me deu a oportunidade de crescimento profissional, e de viver experiências indescritíveis ao lado dos meus amigos de trabalho Fernando Favacho, Ariadne Trindade, Ana Renata, Maynara Santos, Larissa Miranda, Amanda Castro, Ismael Soares, Maria Cardoso, Dryelle Oliveira, Yan Nunes, Pedro Miranda, Enilde Aguiar, Kelly Christina, Diego Barreiros, Mila Façanha, Kleve Canteral e Manuela Raiol.

Ao Grupo de Estudos em Nutrição da Palma de Óleo - NUTRIPALMA, pelo crescimento profissional e amizades: Sheyla Costa, Vivian Rocha, Wendy Medeiros, Nicole Cardoso, Jullya Santos, Eduardo Nunes e Deivison Rodrigues.

À turma A Agronomia 2011 da UFRA/Belém, em especial a “equipe forte” Aline Richart, Anderson Nunes, Antonio Macedo, Hamilton Neto, Marcela Lourinho, Vanessa Cosme e Orlando Maciel pela força e incentivo. Ao lado de vocês me tornei mais forte e persistente para alcançar meus sonhos.

Aos meus amados amigos, Jéssica Vasconcelos, Alexandre Rosa, Madson Maciel, Larissa Húrsula, Rubia Dantas, Taise Carvalho e Safira Silveira pelos momentos de alegria.

Meu muito obrigada a todos!

SUMÁRIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
CAPÍTULO 1 - Considerações gerais.....	1
1 Introdução	1
2 Revisão de literatura	2
2.1 A cultura da cana-de-açúcar e sua importância.....	2
2.2 A fisiologia da cana-de-açúcar.....	3
2.3 Cenário produtivo da cana-de-açúcar para o Brasil.....	5
2.4 Déficit hídrico na cana-de-açúcar	5
2.5 Cana-de-açúcar e a irrigação	7
2.6 O uso de silício como estratégia na atenuação do déficit hídrico em cana-de-açúcar.....	9
2.7 Silício nos solos	11
2.8 Fontes e formas de aplicação de silício	12
3 Referências	14
CAPÍTULO 2 - Fertirrigação silicatada atenua a restrição hídrica por diminuir o estresse oxidativo em cana-planta e em cana-soca cultivadas em diferentes solos.....	21
RESUMO -	21
ABSTRACT	22
1 Introdução	23
2 Material e métodos.....	25
2.1 Local e condições de cultivo	25
2.2 Delineamento experimental	26
2.3 Características dos solos.....	27
2.4 Manejo hídrico dos solos	28

2.5 Manejo da irrigação	29
2.6 Silício	30
2.7 Análises fisiológicas e de crescimento.....	30
3 Resultados	33
3.1 Acúmulo de silício em cana-planta e em cana-soca.....	33
3.2 Carotenoides e antocianinas em MPB cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico na fase de cana-planta e cana-soca.....	35
3.3 Conteúdo de H ₂ O ₂ e MDA.....	37
3.4 Análise de crescimento: área foliar e massa seca da parte aérea.....	39
4 Discussão	44
5 Conclusão	48
6 Referências.....	49
CAPÍTULO 3 - Fertirrigação silicatada melhora o status hídrico em cana- planta e em cana-soca cultivadas sob restrição hídrica em diferentes solos.....	55
RESUMO	55
ABSTRACT.....	56
1 Introdução	57
2 Material e métodos.....	59
2.1 Local e condições de cultivo	59
2.2 Delineamento experimental	59
2.3 Características dos solos.....	59
2.4 Manejo hídrico dos solos	59
2.5 Manejo da irrigação	59
2.6 Silício	59
2.7 Análises fisiológicas e de crescimento.....	59
3 Resultados	62

3.1 Teor de silício em canas-de-açúcar cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico em cana-planta e cana-soca	62
3.2 Índice de extravasamento de eletrólitos e prolina	64
3.3 Conteúdo relativo de água e potencial hídrico de plantas de cana-de-açúcar cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico em cana-planta e cana-soca	66
3.4 Fotossistema: fluorescência inicial (F ₀), fluorescência máxima (F _m) e eficiência quântica do fotossistema II (F _m /F _v)	68
3.5 Clorofila a e clorofila b em MPB cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico na fase de cana-planta e cana-soca	70
3.6 Análise de crescimento: altura, diâmetro do colmo e número de perfilhos	72
3.7 Massa seca da parte aérea de cana-planta e cana-soca em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo distrófico	74
4 Discussão	75
5 Conclusão	80
6 Referências	80
CAPÍTULO 4 - A fertirrigação silicatada via sistema de gotejo subsuperficial melhora o desenvolvimento de plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob restrição hídrica.....	86
RESUMO	86
ABSTRACT	87
1 Introdução	88
2 Material e métodos	89
2.1 Área de cultivo	89
2.2 Condições de plantio	89
2.3 Esquema experimental	90

2.4 Manejo do solo e adubação	90
2.5 Manejo do silício	91
2.6 Condições climáticas	92
2.7 Sistema de irrigação e injeção de fertilizantes	93
2.8 Manejo da irrigação	93
2.9 Avaliações realizadas	95
3 Resultados	96
3.1 Altura	96
3.2 Número de colmos.....	97
3.3 Diâmetro	99
3.5 Produtividade	101
3.6 Silício	102
3.7 Qualidade	103
4 Discussão	105
5 Conclusão	108
6 Referências	109
APÊNDICE.....	113

SILÍCIO VIA FERTIRRIGAÇÃO ALIVIA OS ESTRESSES OCASIONADOS PELO DÉFICIT HÍDRICO EM PLANTAS DE CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADAS EM DIFERENTES SOLOS

RESUMO - A ocorrência de restrição hídrica ao longo do cultivo cana-de-açúcar poderá refletir negativamente em sua produção, especialmente quando acometida nas fases iniciais de desenvolvimento. Somado a isso, a baixa disponibilidade de água poderá afetar a cultura plantada em diferentes localidades e classes de solo. Porém, o fornecimento de elementos benéficos como o silício (Si) durante o cultivo pode evitar danos celulares causados por estresses abióticos, além de estimular o crescimento da cultura. A partir disso, foram realizados três experimentos em estufa com mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, que foram delineados em blocos casualizados, em esquema fatorial 2 x 2, com cinco repetições. O primeiro fator foi o regime hídrico em função da capacidade de retenção de água no solo (CRA): 35% e 70% da CRA, definidas como deficitária e não deficitária; e o segundo fator foi a concentrações de 0 mmol L⁻¹ de Si e 1,8 mmol L⁻¹ de Si. Os tratamentos foram avaliados em diferentes classes de solos (Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico). Os três experimentos foram avaliados tanto nos ciclos de cana-planta quanto na cana-soca. Além disso, com finalidade de validar os resultados obtidos em estufa, um quarto experimento foi realizado em campo, também com MPB, sendo delineado em faixas (Slip-block), em função da capacidade de retenção de água no solo (CRA): 70% (controle sem restrição hídrica), 35% (restrição hídrica) e 10% (semi-sequeiro); e duas condições de Si: ausência (0 mmol L⁻¹) e presença (1,8 mmol L⁻¹) de Si. Foram avaliados parâmetros fisiológicos, bioquímicos, biométricos, químicos e de qualidade tecnológica, com propósito de verificar as respostas da cultura e a viabilidade do fornecimento do Si via fertirrigação. E como resultado, observou-se que a restrição hídrica aumentou o estresse oxidativo devido a alta produção de ERO, levando a degradação de pigmentos fotossintéticos e redução da atividade de antioxidantes não enzimáticos. Além disso, o status hídrico das plantas foi prejudicado, resultando em menor desenvolvimento da cultura. Entretanto, o maior acúmulo de Si devido a seu fornecimento via fertirrigação aliviou os estresses ocasionados pela restrição hídrica, favorecendo o sistema fisiológicos e bioquímicos, diminuindo os danos causados pelo déficit hídrico. Logo, conclui-se que o fornecimento de Si é viável agronomicamente, podendo ser empregado em baixas quantidades em sistemas irrigados de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: elemento benéfico, estresse abiótico, *Saccharum officinarum*, Si

SILICON VIA FERTIRRIGATION RELIEVES STRESS CAUSED BY WATER DEFICIT IN SUGARCANE PLANTS GROWN IN DIFFERENT SOILS

ABSTRACT - The occurrence of water restriction during sugarcane cultivation may reflect negatively on plant production, especially when it occurs in the early stages of development. Added to this, the low availability of water may affect the crop planted in different locations and soil classes. Furthermore, the supply of beneficial elements such as silicon (Si) during cultivation can prevent cell damage caused by abiotic stresses, in addition to stimulating the growth of the culture. From this, three experiments were carried out in a greenhouse with pre-sprouted sugarcane seedlings (MPB), which were designed in randomized blocks, in a 2 x 2 factorial scheme, with five replications. The first factor was the water regime as a function of the soil water regime (SWR): 35% and 70% of SWR, defined as deficit and non-deficit; and the second factor was at concentrations of 0 mmol L⁻¹ of Si and 1.8 mmol L⁻¹ of Si. The treatments were evaluated in different soil classes (Quartzipsamments, Eutrophic Red oxisols and Dystrophic Red oxisols). The three experiments were evaluated in both cane-plant and cane-ratoon cycles. In addition, in order to validate the results obtained in the greenhouse, a fourth experiment was carried out in the field, also with MPB, being designed in strips (Slip-block), depending on the soil water regime (SWR): 70% (control without water restriction), 35% (water restriction) and 10% (semi-irrigated); and two Si conditions: absence (0 mmol L⁻¹) and presence (1.8 mmol L⁻¹) of Si. Physiological, biochemical, biometric, chemical, and technological quality parameters were evaluated, to verify the responses of the culture and the feasibility of supplying Si via fertigation. As a result, it was observed that water restriction increased oxidative stress due to high ROS production, leading to photosynthetic pigment degradation and reduced non-enzymatic antioxidant activity. In addition, the water status of the plants was impaired, resulting in lower crop development. However, the greater accumulation of Si due to its supply via fertigation relieved the stresses caused by water restriction, favoring the physiological and biochemical system, reducing the damage caused by water deficit. Therefore, it can be concluded that the supply of Si is agronomically viable and can be used in low amounts in irrigated sugarcane systems.

Keywords: abiotic stress, beneficial element, *Saccharum officinarum*, Si

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), liderando o mercado de bioenergia, açúcar e derivados (CONAB, 2021a). Entretanto, a inconstância na regularidade de distribuição de chuvas pode inviabilizar a expansão da cultura para outras áreas no país, por afetar a sua produtividade e rendimento (Marin e Nassif, 2013; Vianna e Sentelhas, 2014). Além disso, a cana-de-açúcar é cultivada em solos distintos, que variam em características texturais, químicas e em quantidade de matéria orgânica, que interferem na capacidade de retenção de água no solo, bem como na oferta de água para a cultura (Vianna e Sentelhas, 2014; Teixeira et al., 2020b).

A restrição hídrica limita o crescimento das plantas, por ocasionar desregulação osmótica e afetar os processos de trocas gasosas (Taiz e Zeiger, 2017). Somado a isso, ocorre um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) (Boaretto et al., 2014; Bezerra et al., 2019), que levam a degradação de pigmentos fotossintéticos, bem como a morte celular vegetal, prejudicando a produtividade das culturas (Teixeira et al., 2020a).

Alternativas como o uso de elementos benéficos podem ser empregadas para aliviar os efeitos da restrição hídrica em cana-de-açúcar, como exemplo o Si (Chen et al., 2018). Esse elemento quando absorvido e depositado nas folhas é capaz de proteger as organelas fotossintéticas, favorecendo o aumento dos teores de clorofila e carotenoides (Pei et al., 2010; Sarah et al., 2021), estimulando positivamente as taxas fotossintéticas (Chen et al., 2018; Teixeira et al., 2021).

O acúmulo de Si reduz a taxa transpiratória, aumentando a eficiência de uso de água em plantas (Tale Ahmad e Haddad, 2011; Chen et al., 2016; Teixeira et al., 2021), por estimular a atividade das aquaporinas, proteínas responsáveis por parte do transporte hídrico nas plantas. Como estimulante, atua também, na atividade das ATPases, responsáveis pela absorção e transporte iônico entre as células (Epstein, 1999; Chen et al., 2016).

Ao estimular as atividades fisiológicas, o Si reduz a formação e a atividade das ERO, mitigando os efeitos deletérios da restrição hídrica, e consequentemente incrementa a produção de matéria seca (Pei et al., 2010; Bezerra et al., 2019).

Todavia, as fontes de Si utilizadas e o meio de fornecimento podem afetar a atividade do elemento. Por outro lado, o uso de fontes de Si estabilizadas, como os silicatos estabilizados, pode aumentar a disponibilidade e absorção do Si pelas plantas (Souza Júnior et al., 2021). Somado a isso, o fornecimento de Si via água de irrigação pode melhorar a sua disponibilização. Segundo Oliveira et al. (2007), a fertirrigação potencializa o aproveitamento dos elementos por possuir maior eficiência e facilitar a absorção dos produtos disponibilizados para as plantas.

Diante disto, questiona-se se o fornecimento do Si via água de irrigação é viável agronomicamente dependendo das diferentes características químicas e texturais dos solos utilizados no cultivo da cultura. A hipótese principal seria se o fornecimento de Si fertirrigado aliviaria os sintomas do déficit hídrico, melhorando as variáveis fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e de crescimento.

Na literatura, são ínfimos os resultados que versam sobre a interação entre a fertirrigação com Si e o déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar, especialmente via gotejo subsuperficial. Tampouco, na complexidade da interação em solos de classes texturais distintas, justificando-se a necessidade de novos estudos para elucidar essas informações.

2 Revisão de literatura

2.1 A cultura da cana-de-açúcar e sua importância

A cana-de-açúcar é uma monocotiledônea pertencente a família Poacea, gênero *Saccharum*. De acordo com Daniels e Roach (1987), a origem dessa cultura possivelmente remonta a região da fronteira Indo-Burma-China, já que os autores citam que todos os membros do complexo *Saccharum* e suas espécies ocorreram nessa região, podendo essa ser o centro de diversidade.

Ao longo dos anos, a cultura veio se modificando geneticamente, sendo através de cruzamentos naturais ou induzidos, se configurando hoje como uma

das mais importantes monoculturas do mundo (Priyadarshan e Jain, 2022), gerando a partir do seu beneficiamento, subprodutos como o açúcar e etanol. Além disso, a cultura também pode ser usada para fins de alimentação animal, servindo como suplementação volumosa para o gado (Vitti et al., 2010; Siqueira et al., 2012).

2.2 A fisiologia da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar possui metabolismo fotossintético C₄, formando compostos orgânicos com quatro carbonos na cadeia, que lhe confere melhor uso e captura de CO₂ atmosférico, tendo assim maior eficiência em conversão de energia solar, resultando em altas taxas fotossintéticas (Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017). Sendo assim, a cultura possui um dos melhores rendimentos de biomassa entre os vegetais conhecidos, sendo cultivadas em todo o mundo, em regiões tropicais e subtropicais como a principal fonte de sacarose (Vitti et al., 2010; Byrt et al., 2011).

No processo de fotossíntese, a folha da cana-de-açúcar absorve a luz solar, interagindo com as células do cloroplasto, que são responsáveis por transformar a energia eletromagnética em energia química, formando o ATP e o NADPH, esses que serão utilizados no ciclo de Calvin para reduzir o carbono que entrou na célula (Taiz e Zeiger, 2017). Essa cultura possui dois tipos de cloroplastos: os das células do mesófilo foliar e os das células da bainha vascular. O CO₂ que entra pelos estômatos nas células do mesófilo é fixado como oxaloacetato e reduzido a malato, esse que é transportado para as células da bainha do feixe vascular para ser descarboxilado pela enzima malato-desidrogenase. O CO₂ que foi formado no ciclo de Calvin, se converte em hexose, e a rubisco interage com esse carbono no ciclo, formando o carboidrato (Vitti et al., 2010; Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017).

A cana-de-açúcar no processo de descarboxilação tem como preferência a NADP-ME, porém apresenta também outras duas formas de descarboxilação: via NAD-ME ou pela PEPCK. Isso é importante, pois a cultura tem uma plasticidade na hora de descarboxilar o CO₂, e faz com que a planta aumente a eficiência energética dela, já que ela pode ativar as outras duas rotas, resultando em alto desempenho fotossintético (Vitti et al., 2010; Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017).

Tanto nos tecidos de formação quanto nos de armazenamento de carboidratos, ocorre a presença da Sacarose Fوسفato Sintase (SPS), que junta a glicose com a frutose, formando a molécula de sacarose, que pode ser usada tanto para armazenamento no colmo, como açúcar de transporte para ser usada como energia em órgãos de crescimento (Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017).

Na folha da cana-de-açúcar ocorre a formação da sacarose, no qual o CO_2 vira um ácido com 4 carbonos, passa para a célula da bainha e sofre descarboxilação, reagindo com a rubisco, e formando a triose fosfato (Castro, 2016). A triose fosfato volta para o mesófilo, sai do citosol e se converte em sacarose, ocorrendo acúmulo de sacarose nas células do mesófilo foliar, e com a atividade das invertases, há uma modulação do conteúdo de sacarose (Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017).

Devido ao acúmulo de sacarose no mesófilo, há uma transferência desse açúcar por diferença de gradiente, fazendo com que a sacarose se movimente por via simplástica para as células da bainha. Junto dessas células, tem-se também as células companheiras e um sistema de transporte de soluções da planta, com os feixes do floema e do xilema. Assim, dá-se início a uma entrada de sacarose no floema, levando a uma redução no potencial osmótico comparado ao xilema. Esse processo faz com que o xilema transporte a água para dentro do floema, aumentando o potencial hidrostático, fazendo com que a solução seja levada de uma área de maior pressão para uma menor. Essa solução vai caminhando entre as organelas, e pode ser usada tanto em regiões de crescimento quanto de armazenamento, podendo chegar em células parenquimáticas do colmo, sendo assim, colocada dentro dos vacúolos para que ocorra o acúmulo de sacarose (Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017).

Com o acúmulo da sacarose, também pode ocorrer escapamento desse açúcar para o apoplasto, e inclusive pode voltar para o floema. A cana-de-açúcar consegue armazenar a sacarose (açúcar solúvel) em um órgão que não tem função de armazenamento, como é o caso do colmo. Normalmente, esse processo de acúmulo de sacarose no colmo acontece da base para o ápice (Castro, 2016; Taiz e Zeiger, 2017).

2.3 Cenário produtivo da cana-de-açúcar para o Brasil

No Brasil, a produção de cana-de-açúcar é realizada em condições edafoclimáticas distintas, permitindo sua exploração em praticamente todo o território nacional. Tal fato contribui para que atualmente o país se configure como o maior produtor mundial do setor sucroenergético, produzindo na safra de 2020/21 654,5 milhões de toneladas, essas que foram destinadas à produção de 41,2 milhões de toneladas de açúcar e 29,7 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2021a). De acordo com o terceiro levantamento anual da CONAB, realizado em novembro de 2021, estima-se que a produtividade de cana-de-açúcar para as safras de 2021/2022 seja de 568,43 milhões de toneladas colhidas, que é 13,2% menor que a safra anterior (CONAB, 2021b).

A região Centro-sul concentra a maior produção de cana-de-açúcar no Brasil, com 589 milhões de toneladas colhidas, sendo o estado de São Paulo o maior produtor (CONAB, 2021a). Estima-se que sejam colhidas na safra de 2021/2022, aproximadamente 356,7 milhões de toneladas na região sudeste, representando um volume de matéria-prima 16,8% menor em produção de colmos em relação à safra 2020/21 (CONAB, 2021b).

Os menores índices produtivos da região sudeste devem-se a redução de área destinada ao plantio, que somados a fatores como a sazonalidade das chuvas e períodos de estiagem, que reduziram o potencial da cultura, como verificado na atual safra de 2021/2022, que sofre com o reflexo de problemas climáticos, como as baixas precipitações e geadas, que interferem negativamente na brotação, perfilhamento e desenvolvimento da cana-de-açúcar (CONAB, 2021b).

2.4 Déficit hídrico na cana-de-açúcar

As respostas da cana-de-açúcar frente ao déficit hídrico podem variar de acordo com as características das espécies ou das cultivares escolhidas, devido as particularidades relacionadas a necessidade hídrica e dos estádios de desenvolvimento (Graça et al., 2010; Teixeira et al., 2021). A limitação na disponibilidade de água afeta mais gravemente a atividade fisiológica da cultura quando ocorre no início do período de perfilhamento ou na fase final de crescimento vegetativo (Marin e Nassif, 2013). Por outro lado, o déficit hídrico

imposto no período que antecede a colheita é necessário para o acúmulo de sacarose no colmo e amadurecimento da cultura (Vitti et al., 2010; Castro, 2016).

Apesar das especificidades, em geral, longos períodos de estiagem podem afetar o desenvolvimento da cana-de-açúcar, limitando o acúmulo de biomassa devido à baixa umidade do solo, ocorrência comum durante as estações de outono e inverno (Marin e Nassif, 2013).

O estresse por restrição hídrica pode prejudicar a absorção de água pelas raízes, resultando em desregulação osmótica, fechamento estomático, redução nas taxas de transpiração, além de aumento da temperatura foliar (Zingaretti et al., 2012; Taiz e Zeiger, 2017; Teixeira et al., 2021). O fechamento estomático afeta a captura de CO₂, reduzindo as taxas fotossintéticas, a assimilação de carbono e a síntese de carboidratos (Taiz e Zeiger, 2017), reduzindo o desenvolvimento do vegetal e a produção de massa seca (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2021).

Em estudos realizados por Gonçalves et al. (2010), com quatro cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico moderado e severo, os autores observaram redução na condutância estomática, transpiração foliar, fotossíntese líquida, na eficiência de uso da água, bem como na produção de biomassa em todas as variedades.

As alterações nas trocas gasosas de plantas submetidas ao estresse podem induzir a desregulação na formação de ERO, e a peroxidação lipídica da membrana, como verificado por Boaretto et al. (2014), que ao estudarem duas cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao estresse severo (30% capacidade de água disponível no solo), observaram maiores teores de H₂O₂ e MDA, que são importantes indicadores de estresse. Esses resultados também foram corroborados por autores como Teixeira et al. (2021), que ao avaliarem a cana-de-açúcar comum e a cana energia cultivadas sob déficit hídrico de 30% da CRA do solo, também observaram um aumento de MDA e H₂O₂.

O aumento desenfreado na produção de ERO nas células de plantas sob déficit hídrico pode ocasionar a degradação dos pigmentos fotossintéticos, levando ao aparecimento de clorose nas folhas, como verificado por Teixeira et al. (2020), nos conteúdos de clorofila a, clorofila b e carotenoides totais de plantas de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico.

Os efeitos do déficit hídrico na redução do desempenho fisiológico se refletem no crescimento, como verificado por Machado et al. (2009), que avaliando dois genótipos de cana-de-açúcar submetidos ao déficit hídrico em diferentes fases fenológicas, observaram redução nos teores de sólidos solúveis, na altura e no número e comprimento de entrenós, que resultou em menor acúmulo de matéria seca do colmo. Respostas similares também foram observadas por Jangpromma et al. (2012), que ao avaliarem o crescimento de dez genótipos de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico, verificaram uma redução no diâmetro do caule e na produção de biomassa.

2.5 Cana-de-açúcar e a irrigação

Os intemperes climáticos e diferenças de disponibilidade de água nos solos podem acometer o cultivo da cana-de-açúcar (Vianna e Sentelhas, 2014). E, apesar da seca ser uma problemática para o desenvolvimento da cultura no território brasileiro, há uma tendência da sua expansão regiões em que o estresse hídrico seja relativamente maior, como as áreas de pastagens degradadas na região Centro-Oeste (Marin e Nassif, 2013; ANA, 2019).

A cana-de-açúcar apresenta resiliência aos intemperes ocasionados pelo déficit hídrico, e que apesar de ter seu potencial reduzido, a produção não é totalmente perdida (Vitti et al., 2010). Assim, o uso de irrigação tanto de salvamento quanto complementar e fertirrigações durante a estação seca, podem amenizar os possíveis estresses por déficit hídrico, favorecendo o desenvolvimento da cultura. Esse processo é especialmente necessário no período da pós-colheita, pois a cultura necessita de água para rebrota das soqueiras (ANA, 2019).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2019), existem 3 módulos de irrigação da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, sendo: 1) a irrigação plena, que se propõe a suprir próximo a 100% da restrição hídrica (400 a 1.000 mm/ano); 2) a irrigação deficitária (ou semiplena), que tende a suprir próximo de 50% da restrição hídrica (200 e 400 mm/ano; e 3) a irrigação de salvamento, que dispõe-se a garantir a manutenção inicial das plantas no plantio/rebrota de soqueiras, reduzindo parcialmente o estresse por déficit hídrico no período seco (20 a 100 mm/ano).

Na primeira edição do Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada, realizado pela ANA em 2017, concluiu-se que do total de áreas irrigadas no Brasil, 30% são de lavouras de cana-de-açúcar. A região Centro-sul apresenta 1,72 milhões de hectares com áreas irrigadas, e desse total, 17% são de cana-de-açúcar. Das lavouras de cana-de-açúcar irrigadas, 98,4% são realizadas para salvamento da cultura que está passando por estresse hídrico no campo (ANA, 2017).

Na segunda edição do Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada publicado em 2021, foi verificado que a cultura da cana-de-açúcar possui 3,66 milhões de hectares equipados para irrigação, sendo que desse total, 79,5% é destinado apenas para a fertirrigação, 20,5% são usados para irrigação com água de mananciais. Já para a irrigação padrão, o fornecimento de água para o salvamento de mudas responde por 76% da área, e as áreas suplementares e plenas correspondem por 24% (ANA, 2021).

Em estudos realizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2019), com apoio do Agrosatélite Geotecnologia, foram identificadas as áreas irrigadas e fertirrigadas de cana-de-açúcar no país, e observou-se que a cultura apresenta 2.913 mil ha de áreas com uso de fertirrigação, 567 mil ha com irrigação de salvamento e 182 mil ha com irrigação plena. O Estado de São Paulo é o que mais utiliza a fertirrigação por vinhaça, sendo responsável por 68,45% da área total com essa prática (ANA, 2019).

Estudos provam que a irrigação é uma técnica promissora para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, como verificado por Oliveira et al. (2010), que avaliaram o desenvolvimento e a produtividade de 11 variedades de cana-de-açúcar sob irrigação plena, e concluíram que houve maior perfilhamento e consequente produção de matéria seca em diferentes variedades da cultura.

Ao estudarem a resposta de sete variedades de cana-de-açúcar tratadas sob lâminas de reposição hídrica da evapotranspiração da cultura (ETc): 40; 60; 80 e 100% (gotejo subsuperficial), Oliveira e Braga (2019) verificaram que a reposição de 80% da ETc consegue aumentar em 40,1%, e a lâmina de 60% aumenta em 33,4% a produtividade média das variedades RB92579 e VAT90212 respectivamente comparadas ao tratamento 40% da ETc.

A utilização da irrigação em plantios de cana-de-açúcar vem se tornando uma prática crescente, que além de ajudar a minimizar os estresses

ocasionados pelo déficit hídrico, possibilita a expansão do cultivo para novas áreas ainda não exploradas, podendo aumentar a longevidade do canavial (Marin e Nassif, 2013). Somado a isso, irrigação possibilita a disponibilização de elementos via fertirrigação, dentre eles podemos citar o Si, que é um elemento benéfico para a cultura (Teixeira et al., 2021).

2.6 O uso de silício como estratégia na atenuação do déficit hídrico em cana-de-açúcar

Em plantas, o Si é considerado um elemento benéfico, sendo absorvido na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) pelas raízes laterais, podendo ser de forma ativa, passiva ou rejeitiva (Epstein, 1999; Cornelis et al., 2011). A partir disso, os efeitos deletérios resultantes do déficit hídrico podem ser amenizados com a aplicação do elemento (Chen et al., 2018), viabilizando a produção de culturas como a cana-de-açúcar (Camargo et al., 2017), considerada acumuladora do elemento, que chega a acumular até 10% de Si na matéria seca da parte aérea, valor que pode muitas das vezes ser maior que a quantidade de macronutrientes acumulados (Ma e Yamaji, 2006).

A maior tolerância conferida pelo Si aos vegetais é atribuída ao fortalecimento físico resultante do acúmulo do elemento na parede celular e nos espaços intercelulares na forma de sílica amorfa (Ma, 2004; Ma e Yamaji, 2006), e também aos estímulos nos processos bioquímicos e fisiológicos (Chen et al., 2018).

Há uma associação indireta da aplicação de Si no aumento dos teores de clorofila (Pei et al., 2010), na redução das taxas de transpiração (Sarah et al., 2021), no aumento do conteúdo de água e de absorção de nutrientes (Ming et al., 2012; Sarah et al., 2021; Teixeira et al., 2021), favorecendo as taxas fotossintéticas (Chen et al., 2018).

O Si também favorece o aumento dos teores de antioxidantes não enzimáticos como os carotenoides (Suriyan e Chalermopol, 2009; Sarah et al., 2021; Teixeira et al., 2021), componentes das membranas dos tilacoides, que podem atuar na eliminação do oxigênio singleto ($^1\text{O}_2$) (Foyer, Lelandais e Kunert, 1994), espécie reativa de oxigênio que é tóxica, e leva a peroxidação de lipídeos, resultando em perda de eletrólitos celulares (Awasthi et al., 2015) e da estabilidade de bicamadas lipídicas de membrana (Havaux, 1998).

O Si estimula a atividade de antioxidantes enzimáticos que combatem a atividade de ERO, como relatado por Tale Ahmad e Haddad (2011), em estudos com plantas de trigo submetidas ao déficit hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento. Os autores descrevem os efeitos da aplicação de 2 mmol L⁻¹ de Si no aumento na das atividades da SOD (EC 1.15.1.1), CAT (CAT EC 1.11.1.6), APX (EC 1.11.1.11) e POD (POD EC 1.11.1.7) comparado às plantas não tratadas com Si, mostrando o efeito benéfico do elemento.

A redução nos os danos causados pela oxidação celular também foram observados em estudos realizados por Bezerra et al. (2019), ao aplicarem 600 kg ha⁻¹ de Si em cultivares de cana-de-açúcar submetidas à restrição hídrica por 30 e 60 dias durante as fases de perfilhamento ou de grande crescimento. Os autores observaram um aumento no potencial hídrico e no conteúdo relativo de água nas folhas, nas concentrações de prolina, superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX), sugerindo que Si pode reduzir a produção excessiva de ERO, aumentando os níveis de prolina ou atividades APX na cana-de-açúcar.

Assim como na cana-de-açúcar, uma melhora no significativa na redução dos danos celulares pode ser observada em outras monocotiledôneas a exemplo da cultura do trigo verificado por Pei et al. (2010), que ao fornecerem 1 mmol L⁻¹ de Si na fonte de Na₂SiO₄ em plantas sob déficit hídrico, concluíram que houve diminuição no H₂O₂, no MDA e no vazamento de eletrólitos das folhas, indicando o potencial do elemento em aliviar os estresses nos vegetais.

Além da manutenção celular, a aplicação de Si favorece a maior absorção de nutrientes (Chen et al., 2016; Sarah et al., 2021). Esse fato é explicado pelo estímulo do elemento na atividade da H⁺-ATPase das membranas, bombas de prótons que estão diretamente ligadas à absorção de nutrientes como o K, que é um importante regulador osmótico, pois atua no controle de abertura e fechamento estomático (Liang, 1999; Taiz e Zeiger, 2017).

O alívio dos estresses por déficit hídrico em plantas tratadas com Si também pode ser justificado pelo elemento aperfeiçoar o transporte hídrico na raiz, através de um aumento na atividade das aquaporinas, que são proteínas

responsáveis pelo transporte da água em plantas, e que podem ter a expressão de seus genes (PIPs) estimulada pelo Si (Chen et al., 2016).

Avaliando o efeito do Si fornecido via radicular em mudas de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico (30% da CRA), Teixeira et al. (2020) verificaram que o fornecimento do elemento em plantas deficitárias proporcionou maior eficiência quântica do fotossistema II, clorofila total, carotenoides, menor extravasamento de eletrólitos e conteúdo de prolina, maior potencial osmótico e conteúdo de água, resultando em maior massa seca quando comparado as plantas cultivadas na mesma CRA que não receberam o Si.

Por melhorar a atividade fisiológica de plantas, o Si exerce efeito positivo em cana-de-açúcar, como observado em experimentos realizados por Camargo et al. (2017), que ao fornecerem 600 kg ha⁻¹ de Si via solo na forma de silicato de cálcio e magnésio, concluíram que houve um aumento da produtividade de colmos, de biomassa seca e de açúcar em plantas submetidas ao déficit hídrico em diferentes estádios de desenvolvimento.

2.7 Silício nos solos

Estudos focados na dinâmica do Si no solo são justificáveis, pois ele é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre e desempenha uma série de papéis importantes na nutrição de plantas (Tubana et al., 2016).

Apesar da sua abundância mineral no solo, a deficiência em Si nas áreas de cultivo é algo comum, já que em sua maioria, apresentam baixos teores disponíveis do elemento. Esse processo se agrava especialmente em regiões tropicais, que possuem alto grau de intemperismo, com baixo valor de pH e alta taxa de dessilicação devido a intensa lixiviação (Keeping, 2017), especialmente em classes como Latossolos e Neossolos (Savant et al., 1999; Meyer e Keeping, 2001).

A deficiência de Si em solos também é agravada pelas frequentes colheitas realizadas nas diversas culturas, induzindo a exportação deste elemento das áreas de cultivo (Yan et al., 2018). De acordo com Tubana et al. (2016), nos Estados Unidos da América, as principais safras podem coletivamente absorver do solo 9,55 milhões de toneladas de Si anualmente,

porém a taxa anual de remoção de Si para toda a área agrícola dos EUA é de aproximadamente 21,1 milhões de toneladas.

No caso da cana-de-açúcar, que é uma cultura acumuladora em Si, a deficiência desse elemento pode ocorrer quando os solos apresentarem teores abaixo da faixa de 10 a 20 mg kg⁻¹ de Si (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) (Berthelsen et al., 2002). Já autores como Marafon e Endres (2011) complementam, indicando que teor de Si abaixo da faixa de 6 a 8 mg kg⁻¹ (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) são críticos para o cultivo.

Plantas de cana-de-açúcar cultivadas em áreas com baixos níveis de Si podem apresentar sintomas visuais de deficiência do elemento, que são externados na forma de folhas retorcidas e manchas foliares brancas arredondadas (Wang et al., 2001; Marafon e Endres, 2011).

O manejo do Si para o seu fornecimento às plantas é complexo, tanto pela sua dinâmica química quanto pela baixa solubilidade no solo, logo a fertilização silicatada é uma atividade viável para a manutenção da agricultura (Tubana et al., 2016). Desta forma, o fornecimento de Si pode proporcionar alta resposta no crescimento da cultura, principalmente com uso de fontes solúveis e estabilizadas, que diminuem os riscos de polimerização do elemento (Souza Júnior et al., 2021).

As fontes solúveis podem ter seu efeito otimizado quando fornecidas via água de irrigação (fertirrigação), melhorando a disponibilização imediata do Si na solução do solo e proporcionando alta eficiência de absorção pela cana-de-açúcar (Oliveira et al., 2007), mas isso é pouco pesquisado e utilizado nos cultivos de cana-de-açúcar. Nesta cultura, as pesquisas envolvendo Si e restrição hídrica predominam fontes de Si de solubilidade limitada, exigindo altas doses do silicato para ser incorporadas ao solo, a fim de aumentar sua dissolução (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019).

2.8 Fontes e formas de aplicação de silício

O efeito atenuador de estresse do Si é promissor, entretanto as fontes utilizadas e formas de aplicação podem afetar o desempenho do elemento. Normalmente, o fornecimento de Si às plantas é realizado a partir de escórias de siderurgias, a exemplo dos silicatos de cálcio adicionados via solo (Prado e Fernandes, 2001), porém, esse produto possui baixa solubilidade em água

(Sousa et al., 2010), e segundo Zañão Jr. (2007), dependendo da concentração ministrada, pode haver ausência de resposta ao Si, e em alguns casos como os citados por Birchall (1995), o produto pode polimerizar, formando partículas coloidais de sílica hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

Por outro lado, novos produtos a base de Si estão sendo testados, a exemplo de soluções estabilizadas, como o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, que se diferencia das outras fontes devido a presença de sorbitol em sua composição. O sorbitol é um poliálcool que proporciona maior estabilidade na solução, retardando taxa de polimerização do elemento (Kubicki e Heaney, 2003) e com diminuição do valor pH, pode ocorrer espécies monoméricas de Si (ácido silícico).

A absorção do Si pelas plantas também pode ser afetada pelas formas de aplicação do elemento. Na literatura, muitos trabalhos fazem uso de Si pela via radicular, sendo comum o fornecimento de 1 mmol L^{-1} a 2 mmol L^{-1} de Si via solução nutritiva em sistemas hidropônicos (Pei et al., 2010; Tale Ahmad e Haddad, 2011).

Logo, existem poucos trabalhos relatando os efeitos de novas fontes e formas de aplicação de Si. Neste sentido, a fertirrigação pode ser uma estratégia de maximização dos sistemas de irrigação, levando ao maior aproveitamento dos elementos, já que aplicação é realizada diretamente nas raízes, região de maior demanda, favorecendo a absorção pelas plantas, e aumentando a eficiência de uso dos elementos fornecidos, sendo um ótimo sistema para a otimização do efeito do Si (Teixeira et al., 2021).

Somado a isso, poucos trabalhos citam a dinâmica do Si em solos de texturas diferentes e sua interação com a cultura da cana-de-açúcar neste ambiente, uma vez que solos com textura argilosa, argilo-arenosa, e solos arenosos apresentam diferentes capacidades de armazenamento de água e disponibilidade hídrica variável no tempo e no espaço (ANA, 2017; Camargo, 2017; Teixeira et al., 2020b).

3 Referências

ANA – - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na região Centro-Sul do Brasil**. Brasília, 2017. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2017/07/cana-de-acucar-irrigada-ana.pdf>>. Acesso em 20 de dezembro de 2021.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021) **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada (2ª)**. Disponível em: <<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/a874e62f27544c6a986da1702a911c6b>>. Acesso em 20 de dezembro de 2021.

Berthelsen S, Noble A, Kingston G, Hurney A, Rudd A (2002) Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In **Silicon in agriculture conference** 2:57.

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** 41:189-189. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

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

Boaretto LF, Carvalho G, Borgo L, Creste S, Landell MGA, Mazzafera P, Azevedo RA (2014) Plant physiology and biochemistry water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry** 74:165–175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.016>

Byrt CS, Grof CP, Furbank RT (2011) C4 Plants as biofuel feedstocks: optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective free access. **Journal of integrative plant biology** 53: 120-135. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01023>.

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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>.

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. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

Castro P (2016) **Fisiologia aplicada à cana-de-açúcar**. Piracicaba: Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil-STAB.

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports** 6:1-14. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

Chen D, Wang S, Yin L, Deng X (2018) How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency?. **Frontiers in plant science** 9:281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (2021a). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.7 - Safra 2020/21, n.4 - Quarto levantamento, Brasília: Conab, p.1-62. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/37136_b3e7df44d7d5e801238498af6b39d254. Acesso em: 10 de nov de 2021.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (2021b). **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.8 - Safra 2021/22, n.3 – Terceiro levantamento, Brasília: Conab, p.1-63, 2021b. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/39835_2a34b37eec6ef5d4dac107978bb0103d. Acesso em: 10 de nov de 2021.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. – v.4 - Safra 2017/18, n.4 - Quarto levantamento, Brasília: Conab, p.1-77, 2018a.

Cornelis JT, Delvaux B, Georg RB, Lucas Y, Ranger J, Opfergelt S (2011) Tracing the origin of dissolved silicon transferred from various soil-plant systems towards rivers: a review. **Biogeosciences** 8:89–112. <https://doi.org/10.5194/bg-8-89-2011>

Daniels J, Roach BT (1987) Taxonomy and evolution. In: Heinz D (ed) **Sugarcane improvement through breeding**. Elsevier, New York, pp 7–84

Epstein E (1999) Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology** 50:641–664.

Gonçalves ER, Ferreira VM, Silva JV, Endres L, Barbosa TP, Duarte WDG (2010). Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 14: 378-386. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000400006>

Graça JP, Rodrigues FA, Farias JRB, Oliveira MCN, Hoffmann-Campo CB, Zingaretti SM (2010) Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology** 22:189-197. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202010000300006>

Havaux M (1998). Carotenoids as membrane stabilizers in chloroplasts. **Trends in plant Science** 3:147–151.

Jangpromma N, Thammasirirak S, Jaisil P, Songsri P (2012) Effects of drought and recovery from drought stress on above ground and root growth, and water use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Australian Journal of Crop Science** 6:1298–1304. <https://doi.org/10.3316/informit.732153581387801>

Keeping MG (2017) Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in Plant Science** 8:1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>

Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 67:4113–4121. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00093-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00093-0)

Liang Y (1999) Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant Soil** 209: 217-224. <https://doi.org/10.1023/A:1004526604913>

Ma JF (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition** 50:11-18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>

Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science** 11: 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

Machado RS, Ribeiro RV, Marchiori PER, Machado DFSP, Machado EC, Landell MGA (2009) Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:1575–1582. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>

Marafon AC, Endres L (2011) **Adubação silicatada em cana-de-açúcar**. Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documents (INFOTECA-E).

Marin F, Nassif DS (2013) Climate change and the sugarcane in Brazilian: physiology, conjuncture and future scenario. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 17:232–239. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000200015>

Meyer JH, Keeping MG (Ed) (2001) Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndorfer GH. *Silicon in Agriculture*. Elsevier, Amsterdam, 257–275.

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 Crop Science** 198:14–26. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2011.00486.x>

Oliveira AR, Braga MB (2019). Variedades de cana-de-açúcar submetidas a diferentes lâminas de reposição hídrica por gotejamento subsuperficial. **Energia na agricultura** 34:350-363. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2019v34n3p350-363>

Oliveira ECA, Oliveira RI, Andrade BMT, Freire FJ, Lira Júnior MA, Machado PR (2010) Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 14:951-960. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000900007>

Oliveira SL, Coelho EF, Borges AL (2007) **Irrigação e fertirrigação**. Frutas do Brasil- Banana Produção 1.

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. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9120-9>

Prado RM, Fernandes FM (2001) Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 36:1199-1204. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000900014>

Priyadarshan PM, Jain SM (2022) Cash Crops: An Introduction. In **Cash Crops** (pp. 1-19). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74926-2_1

Sarah MMS, Prado RM, Teixeira GCM, de Souza Júnior JP, de Medeiros RLS, Barreto RF (2021) Silicon Supplied Via Roots or Leaves Relieves Potassium Deficiency in Maize Plants. **Silicon** 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00908-1>

Savant NK, Korndorfer GH, Datnoff LE, Snyder GH (1999) Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition** 22:1853–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>

Siqueira GR, Roth MDTP, Moretti MH, Benatti JMB, Resende FDD (2012) Uso da cana-de-açúcar na alimentação de ruminantes. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, 13.

Sousa JV, Rodrigues CR, Luz JMQ, Sousa VBF, de Carvalho PC, Rodrigues TM, de Brito CH. (2010) Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. **Bioscience Journal** 26.

Souza Junior JP, de Mello Prado R, Soares MB, da Silva JLF, de Farias Guedes VH, dos Santos Sarah MM, Cazetta JO (2021). Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:95-103. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00345-4>

Suriyan Cha-Um, Chalermopol K (2009). Proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) plantlets in response to iso-osmotic salt and water-deficit stress. **Agricultural Sciences in China** 8:51-58. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60008-0](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60008-0)

Taiz L, Zeiger E, Møller IM, Murphy A (2017). **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora.

Teixeira GCM, de Mello Prado R, Rocha AMS, dos Santos LCN, dos 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** 20: 849-859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

Teixeira GCM, de Mello Prado RD, Rocha AMS, Silveira Sousa Junior GD, Gratão PL (2021b). Beneficial Effect of Silicon Applied Through Fertigation Attenuates Damage Caused by Water Deficit in Sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation** 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>

Teixeira GCM, Prado, RM, Rocha AMS, Silveira Sousa Junior GD, Gratão PL (2021a) Beneficial Effect of Silicon Applied Through Fertigation Attenuates Damage Caused by Water Deficit in Sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation** 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>

Teixeira GCM, Rocha AMS, Oliveira KS, dos Santos Sarah MM, de Oliveira Filho ASB, Prado RM Palaretti LF (2020b) Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Científica** 48:170-187. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p170-187>

Tubana BS, Babu T, Datnoff LE (2016) A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture. **Soil Science** 181:393–411. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>

Vianna MDS, Sentelhas PC (2014) Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 49:237-246. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000400001>

Vitti AC, Cantarella H, Trivelin PCO, Rossetto R, Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM, Landell MGA (2010) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas 1, 239-270.

Wang H, Li C, Liang Y (2001) **Agricultural utilization of silicon in China**. In *Studies in plant science* (Vol. 8, pp. 343-358). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80025-2](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80025-2)

Yan GC, Nikolic M, Ye MJ, Xiao ZX, Liang YC (2018) Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture** 17:2138-2150. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)

Zanão Jr. LA, Fontes RLF, Ávila VT (2010) Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:203-206. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000200013>

CAPÍTULO 2 - Fertirrigação silicatada atenua a restrição hídrica por diminuir o estresse oxidativo em cana-planta e em cana-soca cultivadas em diferentes solos

RESUMO - Secas prolongadas podem reduzir o rendimento da cana-de-açúcar, especialmente quando plantadas em solos com limitações químicas e físicas. Entretanto, a aplicação de silício (Si) via fertirrigação pode atenuar esse estresse, só que para isso, é necessário compreender os mecanismos antioxidantes que atuam nesse processo e se os efeitos dessa atividade variam conforme os ciclos da cana-de-açúcar e com a classe de solo. Nesse sentido, foram desenvolvidos três experimentos independentes, utilizando-se mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico. O delineamento foi arranjado em esquema fatorial 2 x 2, considerando duas capacidades de retenção de água no solo (CRA): 35% (restrição hídrica) e 70% (sem restrição hídrica), e duas concentrações de Si: 0 mmol L⁻¹ (-Si) e 1,8 mmol L⁻¹ (+Si), via fertirrigação em cana-planta (primeiro ciclo) e em cana-soca (segundo ciclo). A restrição hídrica sem adição de Si prejudicou o crescimento da cana-planta e da cana-soca cultivada nos diferentes solos, devido aos prejuízos ao sistema fisiológico, resultando no aumento do estresse oxidativo. Entretanto, a fertirrigação silicatada incrementou o acúmulo do elemento, diminuindo o conteúdo de peróxido de hidrogênio e malonaldeído. O efeito do Si na atenuação da restrição hídrica se deve a síntese de compostos antioxidantes não enzimáticos como carotenoides e antocianinas, que apresentaram conteúdos suficientes para atenuar o estresse oxidativo, favorecendo o crescimento da cana-planta e da cana-soca cultivadas nos três solos estudados.

Palavras-chave: estresse oxidativo; elemento benéfico, déficit hídrico, *Saccharum officinarum* L.

Silicate fertigation attenuates water restriction by decreasing oxidative stress in plant cane and ratoon cane cultivated in different soils

ABSTRACT - Prolonged droughts reduce the yield of sugarcane cultivated in different soils, however the application of silicon (Si) via fertigation can mitigate this stress. Thus, it is necessary to understand the antioxidant mechanisms and whether these effects vary with sugarcane cycles and soil class. In this sense, three independent experiments were developed, using pre-sprouted sugarcane seedlings cultivated in Quartzipsamments, Eutrophic Red oxisols and Dystrophic Red oxisols. The design was arranged in a 2 x 2 factorial scheme, considering two soil water regimes (SWR): 35% (water restriction) and 70% (no water restriction), and two concentrations of Si: 0 mmol L⁻¹ (-Si) and 1.8 mmol L⁻¹ (+Si), via fertigation in plant cane (first cycle) and in ratoon cane (second cycle). Water restriction without the addition of Si reduced the growth of plant cane and ratoon cane cultivated in different soils, due to increased oxidative stress. Nevertheless, silicate fertigation increased the accumulation of the element, decreasing the content of hydrogen peroxide and malonaldehyde. The effect of Si in the attenuation of water restriction is due to the synthesis of carotenoid antioxidant compounds, especially anthocyanins that presented sufficient contents to attenuate oxidative stress, favoring the growth of plant cane and ratoon cane in the three soils studied.

Keywords: beneficial element, oxidative stress, water deficit, *Saccharum officinarum* L.

1 Introdução

As mudanças climáticas têm promovido secas prolongadas e altas temperaturas, podendo afetar o crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) (Zhao e Li, 2015). Esse processo é mais prejudicial nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura, principalmente em áreas onde não há irrigação de salvamento, a exemplo da aplicação de vinhaça. O prejuízo é ainda maior quando o canavial é formado pelo sistema de mudas-pré-brotadas, devido a baixa reserva hídrica e energética dos mini-toletes que dão origem a essas MPB (Vitti et al., 2010; Martins et al., 2015). O estresse hídrico ainda pode ser agravado dependendo das propriedades físicas e da capacidade de retenção de água do solo na área de cultivo (Silva et al., 2006; Vianna e Sentelhas, 2014).

A restrição hídrica na cana-de-açúcar afeta o desempenho fisiológico, pois desfavorece o status hídrico foliar, aumentando a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO), que resulta em oxidação celular (Boaretto et al., 2014; Teixeira et al., 2020a). Este dano é agravado pela degradação de pigmentos fotossintéticos a exemplo dos carotenoides (Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020a) e antocianinas (Ali e Hassan, 2017), pois ocorre uma diminuição da eficiência fotossintética e do desenvolvimento vegetal.

Uma estratégia promissora para reduzir os danos causados pelo estresse hídrico é o fornecimento preventivo de Si (Chen et al., 2018). Este elemento atua na proteção dos pigmentos e organelas fotossintéticas (Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020a), possivelmente por melhorar a atividade dos sistemas de defesa antioxidantes, diminuindo a produção desenfreada de ERO (Bezerra et al., 2019; Verma et al., 2019), e favorecendo a produção de biomassa (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019). O benefício do Si deve-se ao incremento do conteúdo de compostos antioxidantes não enzimáticos, como visto em plantas de *Hibiscus sabdariffa* (Ali e Hassan, 2017), fato ainda pouco explorado na cana-de-açúcar.

A absorção de Si pelas plantas depende também da classe do solo e da disponibilidade do elemento. A maioria dos solos apresentam baixos teores disponíveis de Si, principalmente em regiões tropicais que possuem elevado grau de intemperismo, com baixo valor pH e alta taxa de dessilicação devido a intensa lixiviação (Keeping, 2017), especialmente em classes como Latossolos

e Neossolos (Savant et al., 1999; Meyer e Keeping, 2001). Somado a isso, as frequentes colheitas de diversas culturas induzem a exportação deste elemento das áreas de cultivo (Yan et al., 2018). Segundo Berthelsen et al. (2002), os solos são considerados limitantes em Si para o plantio de cana-de-açúcar quando os teores estão abaixo da faixa de 10 a 20 mg kg⁻¹ de Si (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹). Marafon e Endres (2011) complementam, indicando que teor de Si abaixo da faixa de 6 a 8 mg kg⁻¹ (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) são críticos para o cultivo.

O cultivo da cana-de-açúcar em solos deficientes em Si pode ser prejudicial à cultura, induzindo sintomas como manchas brancas arredondadas nas folhas mais novas (Wang et al., 2001; Marafon e Endres, 2011). Desta forma, a adubação silicatada pode propiciar alta resposta no crescimento da cultura, principalmente com uso de fontes de Si solúveis e estabilizadas, que diminuem os riscos de polimerização do elemento (Souza Júnior et al., 2020), e que somado as formas de aplicação otimizadas via água de irrigação, podem melhorar a disponibilização imediata do Si na solução do solo, proporcionando alta eficiência de absorção pela cana-de-açúcar (Oliveira et al., 2007), mas isso é pouco pesquisado e utilizado nos cultivos de cana-de-açúcar. Nesta cultura, as pesquisas envolvendo Si e restrição hídrica predominam fontes de Si que possuem solubilidade limitada, e exigem altas doses do silicato para serem incorporadas ao solo, a fim de aumentar sua dissolução (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019).

Os estudos envolvendo a restrição hídrica e Si na cultura da cana-de-açúcar se restringem a avaliar o estresse induzido em um único ciclo de cultivo (Camargo et al., 2017). Outros estudos embora restritos, indicam que o Si atenua déficit hídrico na cana-de-açúcar por diminuir o estresse oxidativo indiretamente, a partir da redução do vazamento de eletrólitos celular (Teixeira et al., 2020a), e de forma direta pela medida do teor de malonaldeído (MDA), que expressa peroxidação lipídica celular (Bezerra et al., 2019). No entanto, é importante conhecer os motivos da diminuição do estresse oxidativo, sendo atribuído ao efeito do Si o aumento de antioxidantes que diminuem o teor de prolina, um indicativo de estresse (Verma et al., 2019; Teixeira et al., 2020a). Assim, há a necessidade de investigar os compostos antioxidantes na cultura da cana-de-açúcar em ciclos sucessivos de cultivo. O maior detalhamento dos

efeitos mitigadores do Si na expressão do estresse da planta possibilitaria a melhor compreensão do potencial deste elemento na melhoria do crescimento da cultura.

Diante disto, surge a hipótese indicando que o fornecimento do Si via água de irrigação promove adequada absorção do elemento pela cana-de-açúcar. Outra hipótese complementar a ser testada, é se o Si absorvido pela cultura é eficiente na indução da síntese de compostos antioxidantes como carotenoides e antocianinas em quantidades suficientes para atenuar o estresse oxidativo promovido pela restrição hídrica, e consequentemente favoreceria o crescimento da cana-planta e da cana-soca cultivada em diferentes solos com baixo teor do elemento.

Assim, o objetivo desse trabalho foi verificar se o Si fornecido via fertirrigação é eficiente em aliviar os estresses causados pela restrição hídrica em plantas da cana-de-açúcar cultivadas em três diferentes solos, durante os ciclos de cana-planta e cana-soca.

Os resultados da pesquisa permitirão conhecer o potencial do Si na atenuação do déficit hídrico, e caso seja aceita a hipótese, será possível ampliar o uso deste elemento nos cultivos da cana-de-açúcar em escala global dada a amplitude da deficiência deste elemento em diferentes solos.

2 Material e métodos

2.1 Local e condições de cultivo

Foram realizados três experimentos com a cana-de-açúcar da variedade RB 962869, no período de fevereiro a dezembro de 2019. As plantas foram cultivadas em vasos plásticos alocados em estufa plástica agrícola na Universidade Estadual Paulista (Unesp) – Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

Os dados meteorológicos referentes à temperatura máxima, mínima e umidade relativa do ar média foram registrados diariamente por estação climática localizada no interior da estufa, e os dados foram registrados por datalogger CR 10X (Figura 1).

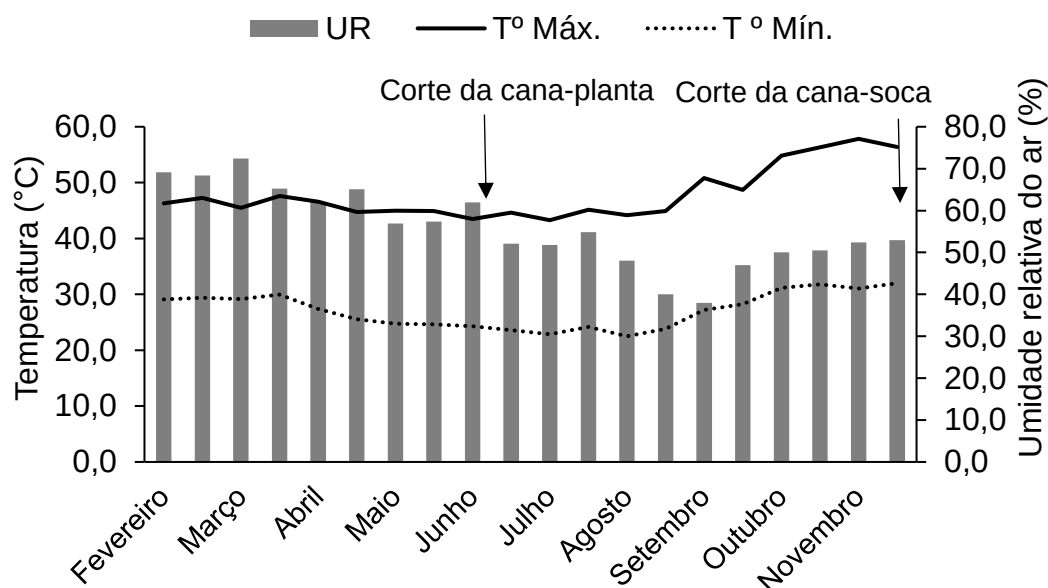


Figura 1. Temperatura máxima (T° Máx.), temperatura mínima (T° Mín.) e umidade relativa do ar (UR) registradas em estufa plástica agrícola durante o cultivo da cana-planta e cana-soca no ano de 2019 em Jaboticabal-SP.

2.2 Delineamento experimental

Foram realizados três experimentos independentes, cada um cultivado em solo distinto, sendo: Neossolo Quartzarênico (NQ), Latossolo Vermelho eutroférico (LVe) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), que foram retirados da camada superficial (0-20 cm de profundidade). Os tratamentos nos três experimentos foram arranjados em esquema fatorial 2 x 2, sendo a capacidade de retenção de água no solo (CRA): mantida a 70% (controle sem restrição hídrica) e 35% (restrição hídrica), combinado com o fornecimento de Si: presença (+Si) e ausência (-Si), dispostos em blocos casualizados, com cinco repetições. Os valores de CRA do solo foram escolhidos com base em trabalhos realizados por Teixeira et al. (2020a), que usaram 70% da CRA do solo como condição ideal de cultivo em vaso. No presente estudo, escolheu-se a condição de 35% da CRA como a metade do valor ideal de água no solo, se configurando como situação de déficit hídrico.

As mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar foram obtidas junto a Usina São Martinho, localizada em Pradópolis-SP. As MPB foram previamente inoculadas com *Rhizobium meliloti*, e aos 60 dias após a emergência (DAE), foram transferidas duas mudas para vaso de polipropileno de 20L (altura de 29

cm e diâmetro de 37 cm), preenchido com 18L de solo, constituindo a unidade experimental.

Após transplântio das mudas, deu-se início ao ciclo de cultivo da cana-planta, tendo duração de 150 dias. Em seguida, a cana-planta foi cortada a 10 cm da base do solo, para que se iniciasse o ciclo da cana-soca, que também teve duração de 150 dias.

2.3 Características dos solos

Os solos foram coletados de áreas de vegetação nativa, nas camadas de 0 a 20 cm e profundidade. O material foi seco ao ar livre e peneirado em peneira com abertura de 2 mm. Em seguida, realizou-se a análise química, seguindo os métodos descritos por Raij et al. (2001), e as análises físicas e granulométricas foram realizadas conforme o manual de métodos de análise de solo da Embrapa (Donagema et al., 2011) (Tabela 1).

Tabela 1 Propriedades química, granulométrica e física de um Neossolo Quartzarênico (NQ), Latossolo Vermelho eutroférico (LVe) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd).

Solo	pH	M.O	P	S	Ca	Mg	Na	K	Al	H+Al	CTC	V%	m%	Si	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³											mg kg ⁻¹					
NQ	4,3	9	2	6	3	1	ns	0,3	0	16	20	21	0	1	<0,12	0	9	1,7	0,4
LVe	6,2	8	8	8	16	5	ns	1	0	17	38,6	57	0	5	0,39	1	5	4,2	0,2
LVd	5,2	9	20	7	14	6	ns	1,2	0	22	44,2	49	0	3	0,32	1	23	4,4	1,4
	Argila		Silte		Areia total		Areia grossa		Areia fina		U%		Uvol.		Da (g cm ³)				
NQ	5		1		94		33		61		14,8		26,04		1,76				
LVe	55		24		21		4		17		46,2		54,56		1,18				
LVd	30		4		66		28		38		27,7		40,09		1,45				

pH - em CaCl₂ por potenciometria; H+Al - em tampão SMP por potenciometria; - M.O - por espectrofotometria; P - em resina por espectrofotometria; S - por turbidimetria; Ca - por espectrometria de absorção atômica; Mg - por espectrometria de absorção atômica; Na - por espectrometria de absorção atômica; K - por espectrometria de absorção atômica; Si - em cloreto de cálcio a 0,01 mol L⁻¹; Al - em KCl por titulometria; S.B. = Ca+Mg+Na+K; CTC = S.B+H+Al; V% = (SB/CTC)* 100; m% = (Al/(SB+Al))*100; B pelo método da

azometina-H por espectrofotometria; Cu, Fe, Mn, Zn - em solução DTPA por espectrometria de absorção atômica.

Em seguida, realizou-se a calagem nos solos conforme indicado por Raij et al. (1997), objetivando elevar a saturação por bases (V%) a 60%, e para isso aplicou-se 312; 46 e 194 mg dm⁻³ de calcário (PRNT: poder relativo de neutralização total de 125%; CaO: 48%; MgO: 16%), nos solos NQ, LVe e LVd, respectivamente. Posteriormente, os solos foram saturados com água deionizada (100% CRA), permanecendo em incubação por 30 dias para reação do produto. Após esse período, realizou-se a drenagem e a adubação fosfatada dos solos NQ, LVe e LVd, aplicando-se via fertirrigação 90; 70 e 50 mg dm⁻³ de P₂O₅ na fonte de superfosfato simples (18% de P₂O₅), respectivamente. Após quinze dias da fosfatagem, os três solos receberam 15 mg dm⁻³ de N na forma de ureia (45% de N), e 100 mg dm⁻³ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (60% de K₂O) também via fertirrigação (Raij et al., 1997).

Juntamente com o fornecimento de N e K, realizou-se a aplicação de 5 mg dm⁻³ de Zn, na forma de sulfato de zinco e 2 mg dm⁻³ de B na forma de ácido bórico, fornecidos via fertirrigação na cana-planta no primeiro dia após o transplântio (DAT), e na cana-soca no primeiro dia após o corte dos colmos (DAC).

Na fase de cana-planta, a adubação de cobertura foi realizada via fertirrigação aos 76 DAT. Na fase de cana-soca, a primeira adubação de cobertura foi realizada no primeiro DAC, e a segunda aos 76 DAC. Em cada adubação foram aplicados 22 mg dm⁻³ de N na forma de ureia (45% de N) nos três solos, e 100; 60 e 60 mg dm⁻³ de K₂O na forma de KCl (60% de K₂O) no NQ, LVe e LVd, respectivamente (Raij et al., 1997).

2.4 Manejo hídrico dos solos

Para mensurar a capacidade de campo, os vasos foram preenchidos com o solo (três repetições por classe de solo) e dispostos em uma caixa-d'água preenchida de água até 2/3 da altura dos vasos, que ficaram imersos dessa forma por um período de 24 horas, até a completa saturação. Em seguida, os vasos foram cobertos com filme plástico, para evitar a evaporação, e colocados para drenar livremente, sendo medidas as suas massas nos

tempos zero e após 24, 36, 48, 60 e 72 horas. A partir da gravimetria, obteve-se os valores do teor de água no solo em cada tempo. Após o escoamento do excesso, restou apenas a água retida (solo úmido), e determinou-se a capacidade de reposição de água pela diferença entre as massas do solo úmido e do solo seco.

A umidade gravimétrica (U_{peso}), umidade volumétrica (θ_{vol}), a densidade do solo (d_s) e as lâminas brutas de irrigação dos tratamentos foram calculadas de acordo com a metodologia de Bernardo, Soares e Mantovani (2008).

A variação de massa diária dos vasos foi medida por lisímetros equipados com célula de carga modelo GL 50 (Alfa Instrumentos Eletrônicos S.A), com capacidade de 50 kg e precisão de 0,57 mm. O sistema de pesagem dos lisímetros foi conectado a um sistema de aquisição de dados, composto por um multiplexador de canais diferenciais (AM 416 Relay Multiplexer, Campbell Sci., Logan – USA) e um datalogger (CR10X Campbell Sci., Logan – USA). O sistema foi energizado por uma bateria de 12 V ligada a uma placa solar. Os dados armazenados foram transferidos para um módulo de memória, utilizando-se como interface o programa PC200W.

2.5 Manejo da irrigação

Para manter a umidade do solo, a irrigação foi realizada manualmente a cada dois dias, entre as 16 e 18 horas, sempre repondo a água perdida pela evapotranspiração diária, mensurada a partir da variação entre a massa inicial e a atual do lisímetro. Em cada experimento foram implantados dois lisímetros, sendo um disposto para o tratamento 35% da CRA e o outro para o 70% da CRA. A cada quinze dias os vasos eram pesados com auxílio de balança digital, com finalidade de corrigir as possíveis variações de massa.

Inicialmente, as mudas de cana-de-açúcar foram mantidas em 70% da CRA até os 30 DAT. A partir desse período, foi realizada a diferenciação dos tratamentos, no qual as plantas que receberiam a restrição hídrica de 35% da CRA passaram por uma redução gradativa de reposição de água no solo: de 30 aos 37 DAT o solo foi mantido em 50% CRA, e a partir dos 37 DAT passou para 35% da CRA. Esse ajuste da CRA se repetiu na fase de cana-soca, onde inicialmente todos os vasos foram mantidos a 70% da CRA, e aos 30 DAC a imposição da restrição hídrica foi iniciada. Tanto na cana-planta quanto na

cana-soca os regimes de 70% e 35% da CRA foram mantidos até o final dos respectivos ciclos.

2.6 Silício

As aplicações de Si foram realizadas juntamente com a água de irrigação a cada dois dias, durante o período de 150 dias de cultivo na fase de cana-planta, e ao longo dos 150 dias do ciclo da cana-soca.

As plantas tratadas com elemento benéfico receberam $1,8 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol ($113,4 \text{ g L}^{-1}$ de Si e $18,9 \text{ g L}^{-1}$ de K_2O com pH 11,8). O valor pH da solução com Si foi mantido entre 5,5 e 6,5, sendo ajustado com solução de NaOH (1 mmol L^{-1}) e HCl (1 mmol L^{-1}).

O teor de potássio presente no silicato foi equilibrado para todos os tratamentos, aplicando-se uma solução de KCl a $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ durante as irrigações.

2.7 Análises fisiológicas e de crescimento

As avaliações fisiológicas foram realizadas na cana-planta entre os 135 e 150 DAT e na cana-soca aos 135 e 150 DAC, no qual foram coletados os tecidos para mensuração dos estresses oxidativos e dos parâmetros biométricos na fase de cana-planta e na cana-soca, nas três classes de solo.

2.7.1 Carotenoides

O teor de carotenoides (CAR) foi mensurado a partir de discos com massa entre 0,025 e 0,030 g de amostras frescas retiradas da primeira folha completamente expandida da cana-de-açúcar. As amostras foram adicionadas em tubos eppendoff contendo 1,5 ml de acetona a 80%, permanecendo até a folha ficar branca. Em seguida, as amostras foram medidas por espectrofotômetro de absorbância a 470 nm. As concentrações de carotenoides foram determinadas seguindo a metodologia de Lichtenthaler e Wellburn (1983).

2.7.2 Antocianinas

A quantificação dos teores de antocianinas (ACYs) foi obtida a partir da pesagem de 0,045 a 0,050 g de massa fresca da primeira folha completamente expandida. O material fresco foi adicionado em tubos eppendorf (2 mL), com 0,48 mL de metanol acidificado (1% de HCl, v/v), e em seguida, foram levadas a câmaras de agitação a 60 rpm, na qual permaneceram no escuro por 48 horas a 4 °C. Após o período de agitação, foram adicionados 0,36 mL de água destilada, e 0,96 mL de clorofórmio. Posteriormente, as amostras foram centrifugadas por 15 minutos a 5.000 g. Por fim, o sobrenadante foi coletado e mensurado em espectrofotômetro de absorvância a 535 nm (Peters et al., 1989).

2.7.3 Malonaldeído (MDA)

A peroxidação lipídica foi determinada a partir da quantificação de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBA), dentre as quais se destaca o MDA. A extração foi realizada com 4 mL de ácido tricloroacético (TCA) 0,1% (p / v) e em seguida as amostras foram centrifugadas a 15.000 g por 15 min a 4 °C. O sobrenadante foi adicionado a 1,5 mL de 0,5% TBA. Os tubos foram agitados e incubados a 95 °C durante 30 minutos. A reação foi interrompida e a mistura foi clarificada por centrifugação a 10.000 g por 5 min a 4 °C. Em seguida, a absorvância da amostra foi registrada em 532 nm e 600 nm em espectrofotômetro (Beckman DU 640). O coeficiente de extinção molar MDA ($1.55 \times 10^5 \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) foi usado para os cálculos, e os resultados foram expressos em nMol g⁻¹ de matéria fresca (MF) (Gratão et al., 2012).

2.7.4 Conteúdo de peróxido de hidrogênio (H₂O₂)

O conteúdo de H₂O₂ foi determinado seguindo o método do iodeto de potássio (KI) proposto por Alexieva et al. (2001). Após maceração em TCA (0,1%), as amostras foram centrifugadas a 12.000 g por 15 minutos a 4 °C. Retirou-se 200 µL do sobrenadante, e adicionou 200 µL de tampão fosfato de potássio 100 mmol L⁻¹ (pH 7,5) e 800 µL de solução 1 mol L⁻¹ de KI. Em seguida, os tubos de reação foram colocados em isopor com gelo tampado, permanecendo no escuro por uma hora. A absorvância foi registrada no comprimento de onda de 390 nm em espectrofotômetro (Beckman DU 640). A

quantidade de H_2O_2 foi mensurada usando uma curva padrão, e os dados expressos em $\mu\text{mol g}^{-1}$ de matéria fresca (MF).

2.7.5 Avaliações de crescimento

Ao final dos 150 dias de cultivo na fase de cana-planta e de cana-soca, a parte aérea das plantas foram cortadas a 10 cm da base do solo, para mensuração da área foliar usando o aparelho LI – 3100 AreaMeter®.

Em seguida, as amostras foram lavadas com água deionizada, solução de detergente 0,1%, solução de HCl 0,3% e novamente com água deionizada, e secas em estufa de ar forçado à temperatura de $65^\circ\text{C} \pm 5$, até atingir massa constante. Após a secagem, foram obtidas a massa seca de folhas, de colmos e da parte aérea (MSPA) (cana-planta e cana-soca), seguida da moagem da amostra em moinho Wiley.

2.7.6 Silício

Para determinar o teor de Si, foram utilizadas 0,1 mg de amostras secas e moídas da massa seca das folhas e de colmos. As amostras foram adicionadas a tubos de polietileno, seguido pela adição de 2,0 mL de H_2O_2 (30% v / v) e 3,0 mL de NaOH (25 mol L^{-1}), em seguida, as amostras foram extraídas seguindo a metodologia de Kraska e Breitenbeck (2010). Realizou-se a leitura do extrato obtido com auxílio do espectrofotômetro a 410 nm para obtenção do conteúdo de Si, seguindo a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004).

Com base nos valores de Si e matéria seca, o acúmulo desse elemento na parte aérea foi calculado seguindo a fórmula: $\text{acúmulo de Si} = [((\text{teor de Si g kg}^{-1}) * (\text{massa da planta g por planta})) / 1000]$.

2.7.7 Avaliação estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância aplicando o teste F, e quando significantes para as variáveis qualitativas, ao teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparação de médias, utilizando o software estatístico SAS 9.2® (Cary, NC, EUA).

3 Resultados

3.1 Acúmulo de silício em cana-planta e em cana-soca

O fornecimento de Si via fertirrigação aumentou o seu acúmulo tanto em cana-planta quanto em cana-soca cultivadas em NQ, LVe e LVd. Somado a isso, a restrição hídrica (35% da CRA) promoveu menor acúmulo de Si, comparado a planta controle (70% da CRA) (Figuras 2a-f).

O acúmulo de Si na cana-planta e na cana-soca também variou de acordo com o órgão da planta avaliado, sendo verificado maiores quantidades do elemento em folhas e menores nos colmos, independente da classe de solo (Figura 2a-f).

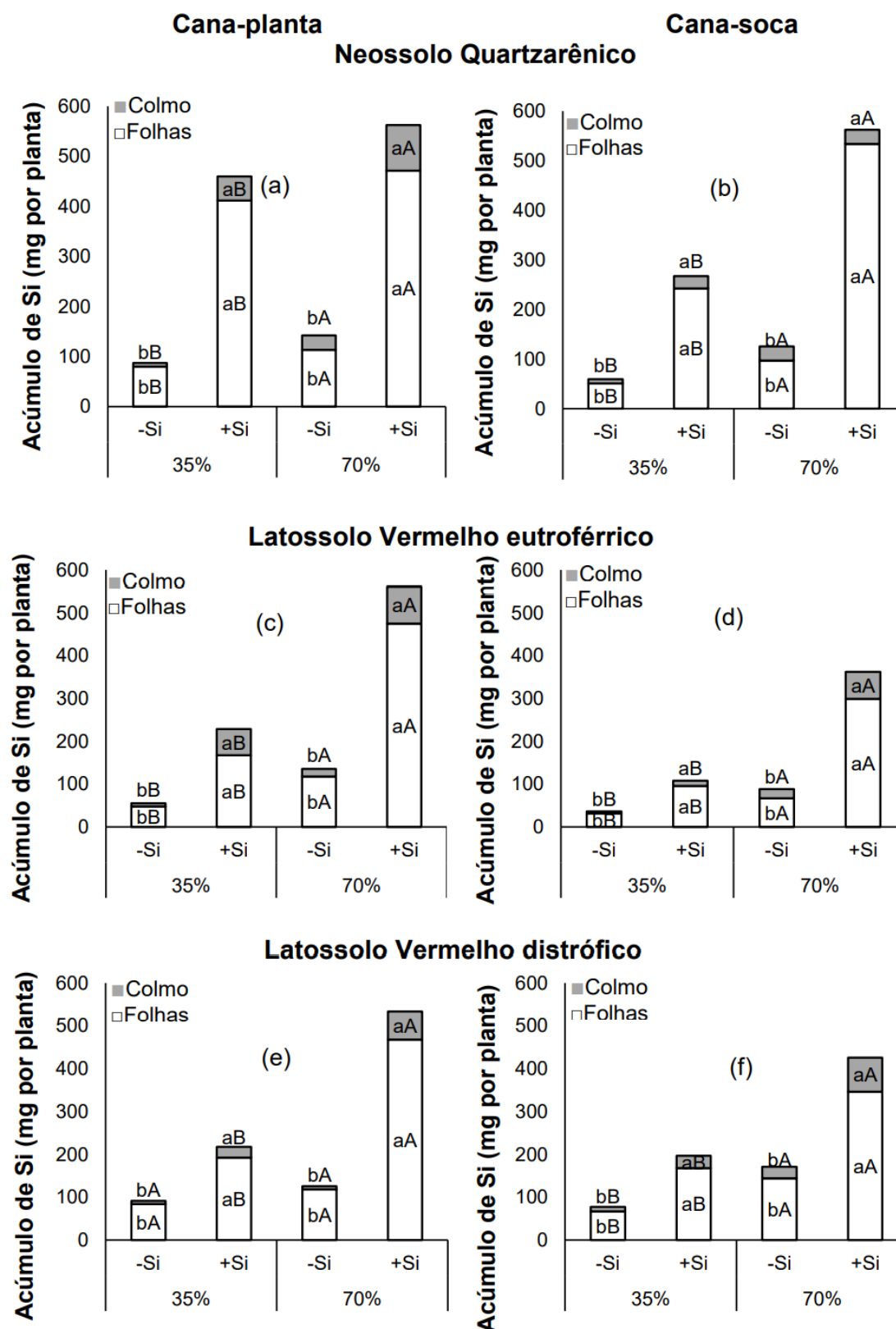


Figura 2. Acúmulo de silício (Si) em folhas e colmos da cana-planta(a) e da cana-soca (b) em Neossolo Quartzarênico; cana-planta (c) e cana-soca (d) em Latossolo Vermelho eutroférico; e cana-planta (e) e cana-soca (f) em Latossolo Vermelho distrófico, na ausência (-Si) e presença de silício (+Si)

fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.2 Carotenoides e antocianinas em MPB cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico na fase de cana-planta e cana-soca

A cana-planta e a cana-soca sob restrição hídrica não fertirrigadas com Si apresentaram redução nos conteúdos de carotenoides e de antocianinas comparado as plantas controle nos três solos estudados (Figuras 3a-l). Por outro lado, a fertirrigação com Si em plantas sob restrição hídrica proporcionou maior conteúdo de carotenoides e de antocianinas (Figuras 3a-l) comparada as plantas que não receberam Si, com exceção das variáveis antocianinas nos ciclos de cana-planta (Figura 3j), cana-soca (Figura 3l), e carotenoides em cana-soca (Figura 3k) cultivada em LVd. Por outro lado, os tratamentos com restrição hídrica que receberam Si se equipararam às plantas controle com ou sem Si apenas nas variáveis carotenoides em cana-planta cultivada em NQ (Figura 3a), e em cana-soca em LVd (Figura 3l); antocianinas na fase de cana-planta (Figura 3b) e cana-soca (Figura 3d) em NQ, e em cana-planta (Figura 3j) e em cana-soca (Figura 3l) em LVd.

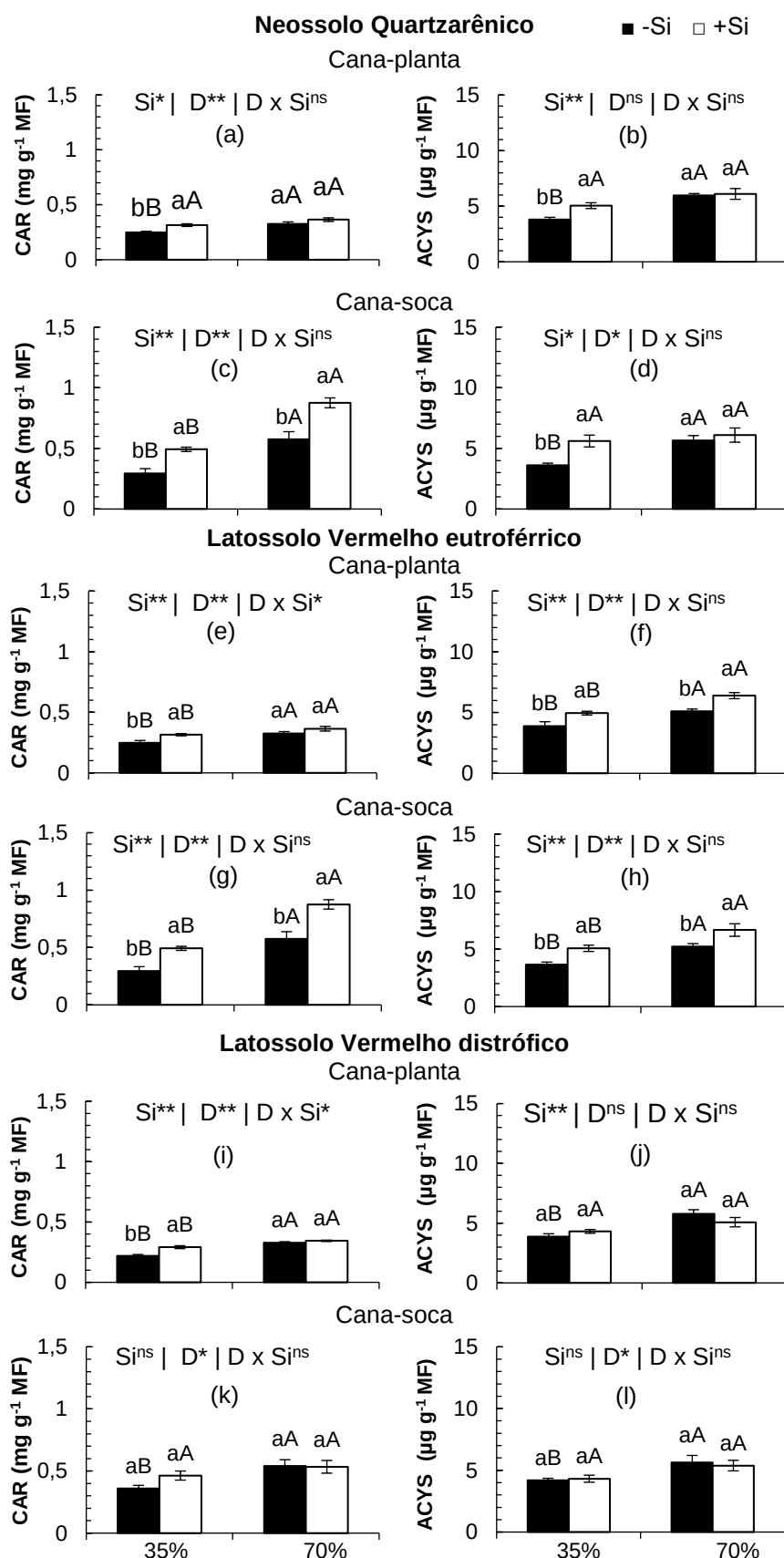


Figura 3. Carotenoides (CAR) (a) e antocianinas (ACYS) (b) em cana-planta, carotenoides (c) e antocianinas (d) em cana-soca (Neossolo Quartzarênico); carotenoides (e) e antocianinas (f) em cana-planta, carotenoides (g) e

antocianinas (h) em cana-soca (Latossolo Vermelho eutrófico); carotenoides (i) e antocianinas (j) em cana-planta, carotenoides (k) e antocianinas (l) em cana-soca (Latossolo Vermelho distrófico), na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.3 Conteúdo de H₂O₂ e MDA

As plantas cultivadas nos ciclos de cana-planta e cana-soca em NQ, LVe e LVd, a restrição hídrica comparado ao controle ocasionou um aumento no conteúdo de H₂O₂ e de MDA (Figuras 4a-l). Contudo, o fornecimento de Si atenuou a restrição hídrica, diminuindo os conteúdos de H₂O₂ e de MDA (Figuras 4 a-l), exceto o conteúdo de MDA na fase de cana-soca cultivada em LVe (Figura 4j). Em plantas controle, o Si via fertirrigação reduziu o conteúdo de H₂O₂ (Figura 4a) e de MDA (Figura 4b) na fase de cana-planta cultivada do NQ, e o conteúdo de H₂O₂ na cana-soca cultivada no LVe (Figura 4g).

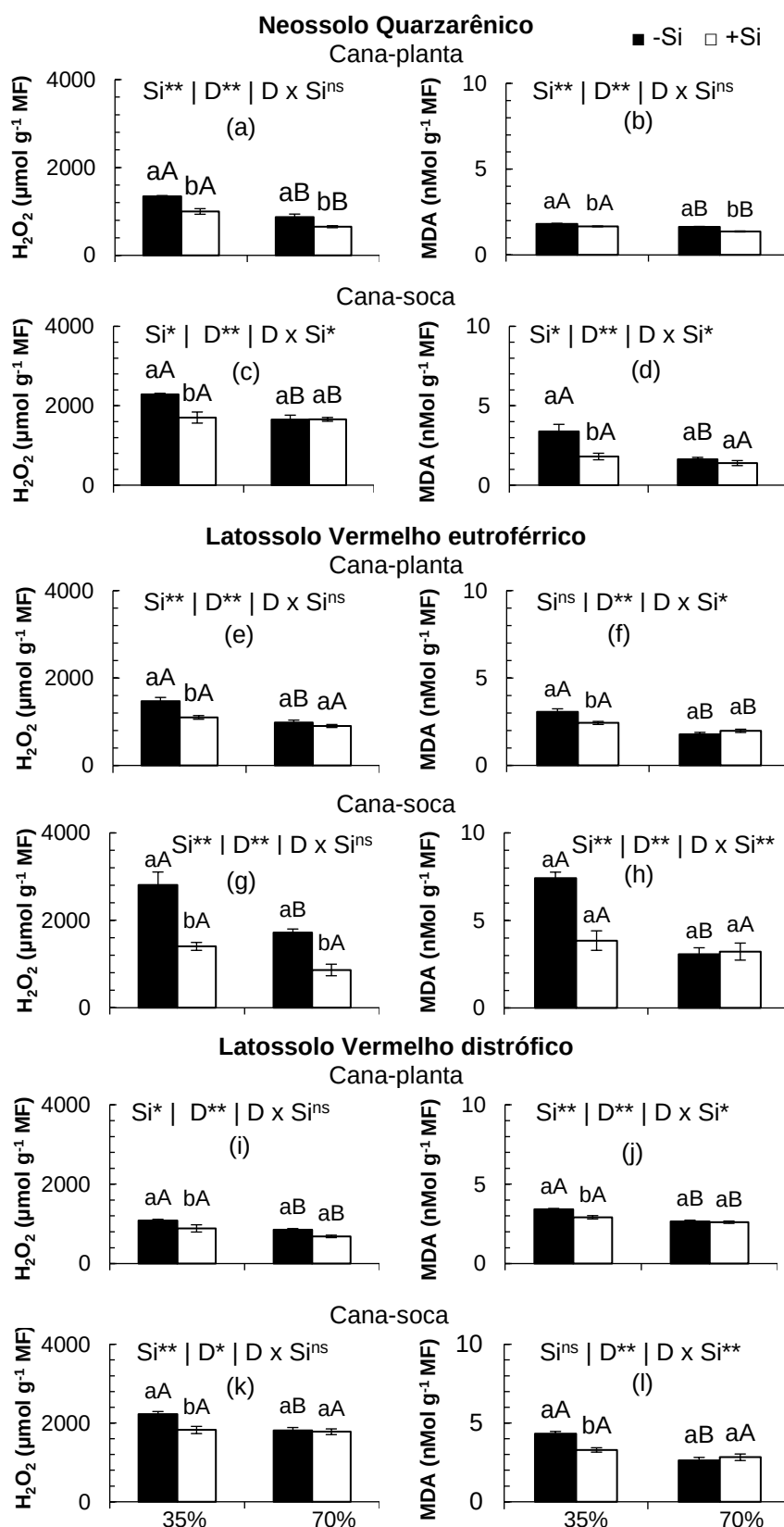


Figura 4. Conteúdo de H_2O_2 (a) e conteúdo de MDA (b) em cana-planta, conteúdo de H_2O_2 (c) e conteúdo de MDA (d) em cana-soca (Neossolo Quartzarênico); conteúdo de H_2O_2 (e) e conteúdo de MDA (f) em cana-planta, conteúdo de H_2O_2 (g) e conteúdo de MDA (h) em cana-soca (Latossolo

Vermelho eutroférico); conteúdo de H_2O_2 (l) e conteúdo de MDA (j) em cana-planta, conteúdo de H_2O_2 (k) e conteúdo de MDA (l) em cana-soca (Latossolo Vermelho distrófico) de canas-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.4 Análise de crescimento: área foliar e massa seca da parte aérea

A restrição hídrica imposta afetou o desenvolvimento da cana-planta e da cana-soca em NQ, LVe e LVd, diminuindo a área foliar e a massa seca da parte aérea (Figuras 5a-l) em comparação ao tratamento controle, mas o fornecimento de Si aumentou a área foliar e a massa seca da parte aérea (Figuras 5a-m) comparado as plantas que não receberam o elemento benéfico. As plantas controles tratadas com Si em relação às não tratadas tiveram incremento da área foliar em cana-planta cultivada em LVe (Figura 5e) e em cana-soca cultivada em LVd (Figura 5k).

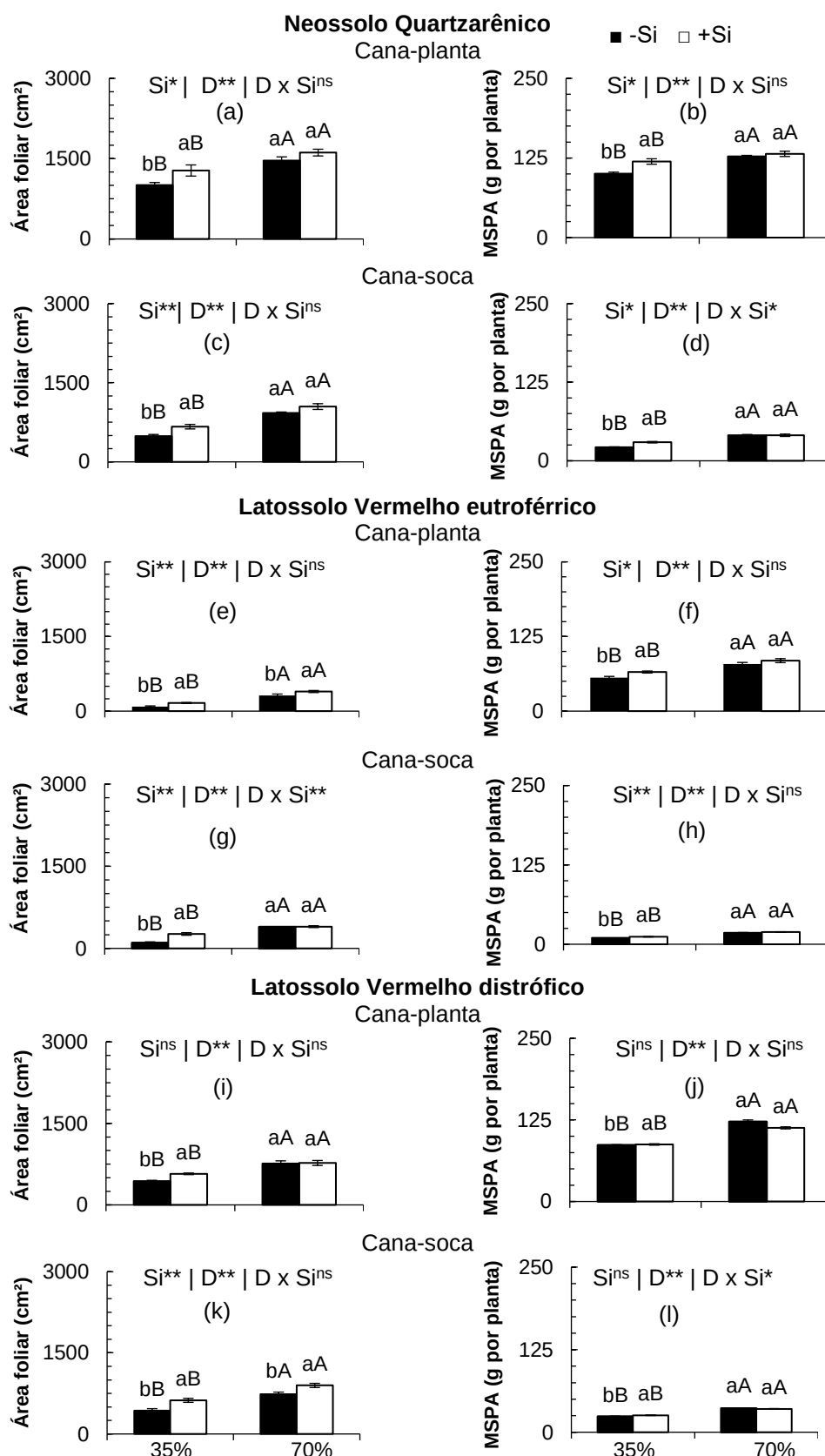


Figura 5. Área foliar (a) e massa seca da parte aérea (MSPA) (b) em cana-planta, área foliar (c) e massa seca da parte aérea (d) em cana-soca (Neossolo Quartzarênico); área foliar (e) e massa seca da parte aérea (f) em cana-planta,

área foliar (g) e massa seca da parte aérea (h) em cana-soca (Latossolo Vermelho eutroférico); área foliar (i) e massa seca da parte aérea (j) em cana-planta, área foliar (k) e massa seca da parte aérea (l) em cana-soca em (Latossolo Vermelho distrófico) de canas-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

As diferenças entre os tratamentos foram observadas visualmente a partir do desenvolvimento vegetativo da cana-planta (Figura 6) e da cana-soca (Figura 7) cultivadas nos três solos.

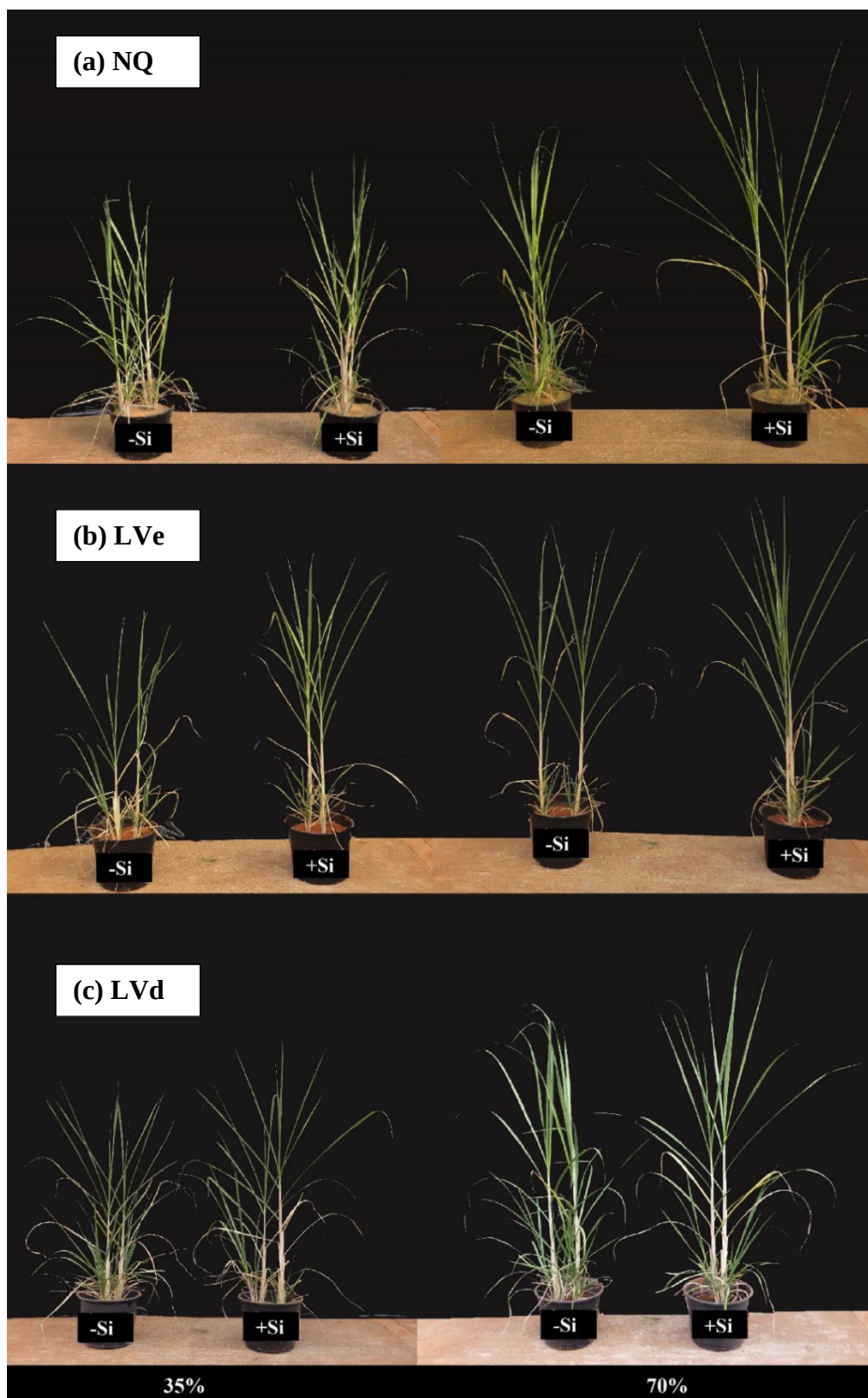


Figura 6. Parte aérea de cana-de-açúcar na fase de cana-planta cultivada em Neossolo Quartzarênico (NQ) (a); Latossolo Vermelho eutrófico (LVe) (b); e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (c), na ausência (-Si) e na presença (+Si) de Si fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo.

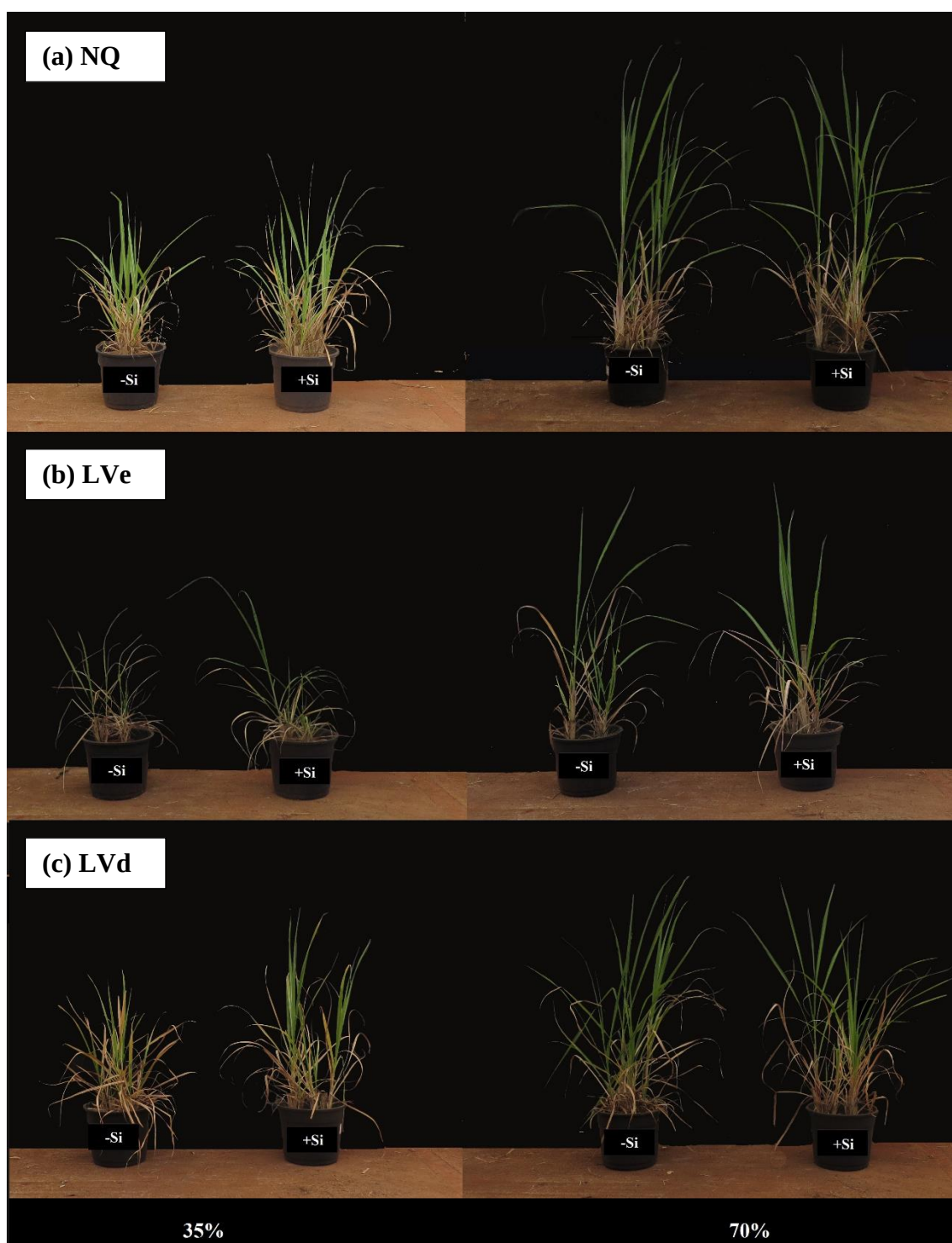


Figura 7. Parte aérea de plantas de cana-de-açúcar na fase de cana-soca cultivadas em Neossolo Quartzarênico (NQ) (a); Latossolo Vermelho eutroférico (LVe) (b); e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (c), na presença (+Si) e ausência (-Si) de Si fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo.

4 Discussão

As mudanças climáticas induzem chuvas irregulares e prolonga os períodos de seca nos cultivos da cana-de-açúcar (Zhao e Li, 2015), podendo ocasionar estresses que irão afetar o crescimento da planta (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019).

Um efeito imediato da restrição hídrica é a diminuição da absorção de Si na cultura da cana-de-açúcar (Camargo et al., 2017; Teixeira et al. 2020a, b), fato também retratado nesse experimento em ambos os ciclos de cultivo pela diminuição da quantidade de Si nas folhas e nos colmos (Figura 2) em relação as plantas controles. Isso ocorre devido a redução do contato íon-raiz que é restringido pela baixa disponibilidade de água, já que a absorção do Si na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) (Jones e Handreck, 1967) ocorre pelo fluxo de massa, que depende do fluxo transpiratório da planta.

Um outro dano importante da restrição hídrica é a degradação de compostos antioxidantes, especialmente em plantas sem fornecimento de Si, que pode ser observado através da diminuição do conteúdo de carotenoides (Figura 2), fato igualmente relatado em plantas jovens de cana-de-açúcar por Teixeira et al. (2020a), e também na redução de antocianina (Figura 2), comportamento também verificado em plantas de *Hibiscus sabdariffa* (Ali e Hassan, 2017), resultando em estresse oxidativo.

Neste estudo, foi observado que o déficit hídrico aumentou os conteúdos de H_2O_2 e de MDA, ou seja, houve a peroxidação lipídica celular das folhas da cana-planta e da cana-soca cultivada nos três solos estudados (Figura 4). Esse processo retrata o estresse oxidativo dada a produção excessiva de ERO, danificando o DNA, proteínas e lipídios, carboidratos e nucleotídeos, aumentando a fluidez da membrana, causando destruição de compostos orgânicos vitais para planta (Apel e Hirt, 2004; Boaretto et al., 2014).

A pesquisa evidenciou que o dano oxidativo promovido pela restrição hídrica sem fornecimento de Si causou efeito prejudicial no metabolismo vegetal, e conseqüentemente no crescimento da cana-planta e da cana-soca cultivada nos três solos (Figuras 5-7). Além disso, as plantas sob restrição hídrica podem usar como mecanismo de sobrevivência a redução da área foliar para diminuir a perda de água para a atmosfera (Chen et al., 2018), diminuindo acúmulo de massa seca, fato observado por Jangpromma et al. (2012), ao

avaliarem o crescimento de dez genótipos de cana-de-açúcar submetidas a restrição hídrica.

A maioria dos estudos com déficit hídrico em cana-de-açúcar não tratada com Si revelaram danos no crescimento da planta atribuído aos prejuízos fisiológicos (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020a; Verma et al., 2020), e poucos indicam o estresse oxidativo (Bezerra et al., 2019). Este fato é preocupante, pois o estresse oxidativo é um dano biológico severo que causa comprometimento do metabolismo, degrada compostos orgânicos vitais da planta (Apel e Hirt, 2004) e consequentemente limita o crescimento das plantas.

Cabe destacar ainda que, foi observado que a cana-planta sob restrição hídrica sem fornecimento de Si apresentou maior produção de massa seca da parte aérea 363% (NQ), 471% (LVe) e 261% (LVd) em relação a cana-soca na mesma condição (Figuras 5-7). Essa constatação era esperada, pois a restrição hídrica somada ao processo de corte dos colmos da cana-planta afeta o ciclo da cana-soca (Abreu et al., 2013), agravando o estresse e diminuindo acúmulo de massa seca da soqueira. Portanto, os prejuízos da restrição hídrica são mais intensos na cana-soca em relação a cana-planta.

Para mitigar os danos do déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar a partir do fornecimento do Si, é primordial que seja feito o uso eficiente deste elemento. A maioria dos estudos com aplicação de Si na cultura da cana-de-açúcar empregam fontes de solubilidade limitada, que exigem sua incorporação no solo, além haver a necessidade do fornecimento de doses relativamente altas (Leite et al., 2008; Bezerra et al., 2019; Camargo et al., 2019). Assim, é necessário fontes mais solúveis do elemento que possam ser utilizadas em fertirrigação.

Uso de fontes solúveis poderia minimizar as perdas do elemento por polimerização, processo que forma cadeias longas polimérica de O-Si-O em solução, especialmente em concentração acima de 3 mmol L⁻¹ de Si (Souza Júnior et al., 2020), prejudicando sua absorção na forma monomérica (H₄SiO₄). É importante o manejo para minimizar a polimerização do elemento e maximizar a absorção pela planta. O nosso estudo indicou de forma clara a importância do fornecimento do Si solúvel na concentração de 1,8 mmol L⁻¹ via fertirrigação, pois propiciou ótima absorção deste elemento, comprovado pelo

incremento do acúmulo de Si nas plantas, verificado tanto em cana-planta quanto na cana-soca, nas três classes de solos estudadas (Figuras 2a-f).

A pesquisa indica que é possível melhorar a eficiência da fertilização de Si na cultura da cana-de-açúcar com uso da fertirrigação nos três solos estudados, fato também indicado por Teixeira et al. (2020a) em plantas jovens de cana-de-açúcar, mas são necessárias mais pesquisas para um melhor entendimento. Cabe destacar que essa alta absorção de Si ocorreu por se tratar de uma planta acumuladora (Meyer e Keeping, 2001), que apresenta transportadores de alta eficiência, predominantes em poáceas (Ma e Yamaji, 2015).

O alto acúmulo de Si em cana-de-açúcar submetidas a restrição hídrica que foram tratadas com elemento benéfico evitou a degradação de compostos orgânicos por atuar na manutenção dos conteúdos de carotenoides e antocianinas (Figuras 3a-m) nos ciclos de cana-planta e cana-soca cultivadas nos diferentes solos, exceto a variável antocianina em cana-planta e cana-soca cultivadas em LVd (Figuras 3 j e l). O benefício desse elemento na atividade do composto antioxidante carotenoide em plantas de cana-de-açúcar sob restrição hídrica é pouco relatado nesta cultura, havendo indicação de Camargo et al. (2019) e de Teixeira et al. (2020a). No entanto, constitui o primeiro relato do efeito do Si no aumento das antocianinas na cana-de-açúcar cultivada sob restrição hídrica. O aumento deste composto antioxidante foi visto em outras espécies como em *Hibiscus sabdariffa* sob restrição hídrica (Ali e Hassan, 2017) e em soja sob estresse ocasionado por restrição hídrica associada a radiação ultravioleta-B (Shen et al., 2010).

A deposição de Si na epiderme das folhas além de melhorar a sustentação da planta, protege as organelas fotossintéticas, evitando a degradação de pigmentos como carotenoides e antocianinas. O incremento de carotenoides ocasionado pelo tratamento com Si é importante para o funcionamento do aparato fotossintético, já que atua como acessório na absorção de luz fotossintética e protege a clorofila a da fotooxidação no centro de reação (Lichtenthaler, 1987). As antocianinas também atuam como fotoprotetores em condições estressantes, ajudando a eliminar ERO produzidas (Shen et al., 2010)

A capacidade antioxidante da antocianina pode justificada pela sua carga positiva, número e posição dos grupos hidroxila e metoxila, a presença de substituintes doadores de elétrons e removedores de elétrons, que as tornam eficazes em doar hidrogênio para EROs e radicais livres, proporcionando a desintoxicação e evitando a formação de radicais. Esse efeito protege as biomoléculas importantes como proteínas, lipídios e DNA do dano oxidativo (Martin et al., 2017; Nassour et al., 2020).

O fornecimento do Si no aumento de compostos antioxidantes na cana-planta e cana-soca cultivadas sob restrição hídrica nos três solos esteve associado a diminuição do estresse oxidativo, comprovado pela diminuição do conteúdo de H_2O_2 e de MDA (Figura 4). A diminuição da peroxidação lipídica promovida pelo Si é reflexo da diminuição de ERO por ação dos compostos antioxidantes não enzimáticos (Bezerra et al., 2019) e enzimático (Verma et al., 2019). Os carotenoides, pigmentos presentes nas membranas dos tilacoides, atuam na eliminação de ERO, evitando por exemplo, a formação do oxigênio singlete (Foyer et al., 1994), fato semelhante ocorre com as antocianinas ao inibir a peroxidação lipídica da membrana celular (Landi et al., 2015).

A importância do Si na mitigação da restrição hídrica se inicia ao induzir resposta bioquímica na cultura da cana-de-açúcar, resultado do efeito somatório de dois antioxidantes, que favoreceu o ótimo metabolismo vegetal e consequentemente o crescimento da planta verificado pelo aumento da área foliar e da massa seca da parte aérea (Figura 5). Esta constatação benéfica do Si na cultura da cana-de-açúcar é robusta cientificamente, pois esse fato ocorreu na cana-planta e na cana-soca e em três solos mais cultivados pela cultura em regiões tropicais, constituindo primeiro estudo nestas condições.

O efeito benéfico do Si em cana-de-açúcar cultivada sob restrição hídrica também foi constatado por outros autores, mas utilizando doses elevadas (600 kg ha^{-1} de Si) na forma de silicato de cálcio e magnésio incorporadas ao solo, sendo atribuído ao aumento de pigmentos fotossintetizantes (Camargo et al. 2019), que favoreceu aspectos bioquímicos e fisiológicos (Bezerra et al., 2019). No entanto, apenas um estudo usando fontes solúveis de Si (silicato de potássio) em fertirrigação, que favoreceu crescimento inicial da cultura, sendo atribuído pelos autores a melhoria dos aspectos fisiológicos da planta (Teixeira et al., 2020a).

É importante destacar que a resposta da cana-de-açúcar a aplicação do Si ocorreu devido aos solos utilizados apresentarem teores baixo do elemento iguais a 1; 5 e 3 mg kg⁻¹ de Si (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) (Tabela 1) respectivamente para NQ, LVe e LVd. Estes teores de Si disponíveis nos solos estão abaixo do adequado para a cultura segundo Berthelsen et al. (2002), que citam que os teores devam ser maiores que 20 mg kg⁻¹ de Si em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, e maiores que 24 mg dm⁻³ de Si em ácido acético 0,5mol L⁻¹ (Kordorfer et al., 1999). A restrição de Si disponível nos solos se deve ao material de origem, sendo ácidos e altamente intemperizados (Savant et al., 1999; Meyer e Keeping 2001). A evidência da deficiência de Si nestes solos ficou visível nas plantas, devido ao aparecimento de sintomas como pequenas manchas esbranquiçadas nas folhas +1 (Apêndice 1) das plantas sem fornecimento deste elemento, fato raro na literatura, e apenas descrito por Wang et al. (2001) e Marafon e Endres (2011).

Ficou evidenciado na nossa pesquisa que a primeira hipótese pode ser aceita, pois o fornecimento do Si via água de irrigação foi viável, favorecendo a sua absorção pela planta cultivada nos dois regimes hídricos e em três classes de solo.

A outra hipótese também pode ser aceita, pois o Si absorvido pela planta foi eficiente em induzir a síntese de compostos antioxidantes como carotenoides, e especialmente as antocianinas, suficientemente para atenuar o estresse oxidativo promovido pela restrição hídrica, favorecendo o crescimento da cana-planta e da cana-soca cultivadas em diferentes solos deficientes do elemento.

A pesquisa propõe uma estratégia sustentável para áreas com ocorrência de seca, a partir do fornecimento de silício via fertirrigação na concentração de 1,8 mmol L⁻¹ de Si para cultivo da cana-de-açúcar em solos deficientes deste elemento, cenário comum em diferentes regiões tropicais.

5 Conclusão

O déficit hídrico diminuiu o crescimento da cana-planta e da cana-soca cultivada nos três solos, mas a fertirrigação com fornecimento de Si foi eficiente

para aumentar a absorção do elemento, atenuando os efeitos do estresse hídrico da cultura.

A atenuação da restrição hídrica devido ao Si se deve a modulação da síntese dos compostos antioxidantes carotenoides, e especialmente às antocianinas, que apresentaram conteúdos suficientes para reduzir o estresse oxidativo dada diminuição da peroxidação lipídica, favorecendo assim o crescimento vegetativo tanto da cana-planta quanto da cana-soca cultivadas em diferentes solos tropicais.

6 Referências

Abreu MLD, Silva MDA, Teodoro I, Holanda LAD, Sampaio Neto GD (2013) Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Bragantia** 72: 262-270. <https://doi.org/10.1590/brag.2013.028>

Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, Karanov E (2001) The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment** 24:1337–1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>

Ali EF, Hassan FAS (2017) Water stress alleviation of roselle plant by silicon treatment through some physiological and biochemical responses. **Annual Research & Review in Biology** 1-17. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2017/37670>

Apel K, Hirt H (2004) Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology** 55: 373-399. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>

Bernardo S, Mantovani EC, Soares AA (2008) **Manual de Irrigação** (9nd ed.). Viçosa, UFV.

Berthelsen S, Noble A, Kingston G, Hurney A, Rudd A (2002) Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In **Silicon in agriculture conference** 2:57.

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** 41:189-189. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2980-0>

Boaretto LF, Carvalho G, Borgo L, Creste S, Landell MGA, Mazzafera P, Azevedo RA (2014) Plant physiology and biochemistry water stress reveals differential antioxidant responses of tolerant and non-tolerant sugarcane genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry** 74:165–175. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.016>

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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>.

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. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

Chen D, Wang S, Yin L, Deng X (2018) How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency?. **Frontiers in plant science** 9:281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>

Donagema GK, de Campos DB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JM (2011) **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E).

Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences** 91:11-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

Foyer CH, Lelandais M, Kunert KJ (1994) Photooxidative stress in plants. **Physiologia plantarum** 92:696-717. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb03042.x>

González, L., & González-Vilar, M. (2001). Determination of relative water content. In *Handbook of plant ecophysiology techniques* (pp. 207-212). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-48057-3_14

Gratão PL, Monteiro CC, Carvalho RF, Tezotto T, Piotto FA, Peres LEP, Azevedo RA (2012) Biochemical dissection of diageotropica and never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry** 56:79–96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Jangpromma N, Thammasirirak S, Jaisil P, Songsri P (2012) Effects of drought and recovery from drought stress on above ground and root growth, and water use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Australian Journal of Crop Science** 6:1298–1304. <https://doi.org/10.3316/informit.732153581387801>

Jones LHP, Handreck KA (1967). Silica in soils, plants, and animals. In **Advances in agronomy** (Vol. 19, pp. 107-149). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60734-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60734-8)

Keeping MG (2017) Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in plant science** 8:760. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>

Korndörfer, G. H., Coelho, N. M., Snyder, G. H., & Mizutani, C. T. (1999). Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23, 101-106.

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (Eds) (2004) Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia MG. Instituto de Ciências Agrárias. Universidade Federal de Uberlândia. Boletim Técnico, 2. 50p.

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

Landi M, Tattini M, Gould KS (2015) Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. **Environmental and Experimental Botany** 119:4-17. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.05.012>

Leite GMV, Andrade LADB, Garcia JC, Anjos IAD (2008) Efeitos de fontes e doses de silicato de cálcio no rendimento agrícola e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar, cultivar SP80-1816. **Ciência e Agrotecnologia** 32:1120-1125. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000400013>

Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls Carotenoids. Chlorophylls Carotenoids Pigment. **Photosynth** **Biomembrane** 148:350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

Lichtenthaler HK, Wellburn AR (1983) Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions** 603:591–592.

Ma JF, Yamaji N (2015) A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science** 20:435-442. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>

Ma JF, Miyake Y, Takahashi E (2001) Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in plant Science** 8:17-39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9)

Marafon AC, Endres L (2011) **Adubação silicatada em cana-de-açúcar**. Embrapa Tabuleiros Costeiros-Docmentos (INFOTECA-E).

Martín J, Navas MJ, Jiménez-Moreno AM, Asuero AG (2017) **Anthocyanin pigments: Importance, sample preparation and extraction**. *Phenolic Compounds-Natural Sources, Importance and Applications*, 117-152.

Meyer JH, Keeping MG (Ed) (2001) Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndorfer GH. *Silicon in Agriculture*. Elsevier, Amsterdam, 257–275.

Nassour R, Ayash A, Al-Tameemi K (2020) Anthocyanin pigments: Structure and biological importance. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences** 13: 45-57.

Oliveira SL, Coelho EF, Borges AL (2007) **Irrigação e fertirrigação**. Frutas do Brasil- Banana Produção 1.

Peters JL, Van Tuinen A, Adamse P, Kendrick RE, Koornneef M (1989) High pigment mutants of tomato exhibit high sensitivity for phytochrome action. **Journal of plant physiology** 134:661-666. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(89\)80024-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(89)80024-0)

Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani, AMC (1997) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo** (Vol. 285). Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC.

Savant NK, Korndorfer GH, Datnoff LE, Snyder GH (1999) Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition** 22:1853–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>

Shen X, Zhou Y, Duan L, Li Z, Eneji AE, Li J (2010) Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. **Journal of plant physiology** 167:1248-1252. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.04.011>

Silva EMD, Lima JEFW, Azevedo JAD, Rodrigues LN (2006) Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 41:323-330. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000200018>

Souza Junior JP, de Mello Prado R, Soares MB, da Silva JLF, de Farias Guedes VH, dos Santos Sarah MM, Cazetta JO (2021). Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:95-103. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00345-4>

Teixeira GCM, de Mello Prado R, Rocha AMS, dos Santos LCN, dos 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** 20: 849-859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

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 e0240847. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847>

Verma KK, Liu XH, Wu KC, Singh RK, Song QQ, Malviya MK, ... Li YR (2019) The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon** 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00228-z>

Verma KK, Song XP, Zeng Y, Li DM, Guo DJ, Rajput VD, ... Li YR (2020) Characteristics of leaf stomata and their relationship with photosynthesis in *Saccharum officinarum* under drought and silicon application. **ACS omega** 5:24145-24153. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03820>

Vianna MDS, Sentelhas PC (2014) Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 49:237-246. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000400001>

Wang H, Li C, Liang Y (2001) **Agricultural utilization of silicon in China**. In Studies in plant science (Vol. 8, pp. 343-358). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80025-2](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80025-2)

Yan GC, Nikolic M, Ye MJ, Xiao ZX, Liang YC (2018) Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture** 17:2138-2150. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)

Zhao D, Li YR (2015) Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy** 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/547386>

CAPÍTULO 3 - Fertirrigação silicatada melhora o status hídrico em cana-planta e em cana-soca cultivadas sob restrição hídrica em diferentes solos

RESUMO - A restrição hídrica afeta a fisiologia e o desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar cultivada em diferentes ciclos e classes de solos, entretanto a aplicação de silício (Si) via fertirrigação pode atenuar os efeitos deletérios desse estresse. Para isso, foram desenvolvidos três experimentos independentes, utilizando-se mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico. O delineamento foi arranjado em esquema fatorial 2 x 2, considerando duas capacidades de retenção de água no solo (CRA): 35% (restrição hídrica) e 70% (sem restrição hídrica), e duas concentrações de Si: 0 mmol L⁻¹ (-Si) e 1,8 mmol L⁻¹ (+Si), via fertirrigação em cana-planta (primeiro ciclo) e em cana-soca (segundo ciclo). A restrição hídrica sem adição de Si reduziu o status hídrico foliar, as clorofilas a e clorofilas b, a atividade do fotossistema II, a rigidez celular e o crescimento da cana-planta e da cana-soca cultivada nos diferentes solos. Entretanto, a fertirrigação silicatada incrementou o teor do elemento, aumentando água nas células, evitando a degradação dos pigmentos fotossintéticos e da parede celular, melhorando a atividade do fotossistema e consequentemente aumentando o desenvolvimento vegetativo. Logo, a fertirrigação silicatada é uma alternativa a redução dos estresses ocasionados pela restrição hídrica em plantas de cana-planta e cana-soca.

Palavras-chave: deficiência em silício; estresse abiótico; elemento benéfico, *Saccharum officinarum* L.

Silicate fertigation improves water status in plant cane and ratoon cane grown under water restriction in different soils

ABSTRACT - Water restriction affects the physiology and vegetative development of sugarcane cultivated in different cycles and soil classes, however the application of silicon (Si) via fertigation can attenuate the deleterious effects of this stress. For this, three independent experiments were developed, using pre-sprouted sugarcane seedlings cultivated in Quartzipsamments, Eutrophic Red oxisols and Dystrophic Red oxisols. The design was arranged in a 2 x 2 factorial scheme, considering two soil water regimes (SWR): 35% (water restriction) and 70% (no water restriction), and two concentrations of Si: 0 mmol L⁻¹ (-Si) and 1.8 mmol L⁻¹ (+Si), via fertigation in plant cane (first cycle) and in ratoon cane (second cycle). Water restriction without Si addition reduced leaf water status, chlorophyll a and chlorophyll b, photosystem II activity, cellular rigidity and growth of plant cane and ratoon cane cultivated in different soils. Meanwhile, silicate fertigation increased this element content, increasing water in cells, preventing the degradation of photosynthetic pigments and cell wall, improving photosystem activity, and consequently increasing vegetative development. Therefore, silicate fertigation is an alternative to reduce the stresses caused by water restriction in plant cane and ratoon cane.

Keywords: silicon deficiency; abiotic stress; beneficial element, *Saccharum officinarum* L.

1 Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma cultura semi-perene, com necessidade hídrica que varia entre 1.500 a 2000 mm para chegar a fase final de produção, mas podendo variar de acordo com o local e cultivar escolhidos (Doorenbos e Kassam, 1979). Segundo Barbieri (1981), o consumo médio diário da cultura no Brasil é de 2,5 mm. Perante a essa necessidade, o bom desenvolvimento dessa cultura pode estar ameaçado devido as mudanças climáticas, que trazem aumento de temperatura e secas prolongadas, causando estresses por restrição hídrica (Zhao e Li, 2015).

As respostas da cana-de-açúcar a restrição hídrica podem variar de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura e o grau de estresse, sendo especialmente prejudicial nas fases iniciais e intermediárias de desenvolvimento (Zhao e Li, 2015). O menor desempenho fisiológico devido à redução no status hídrico foliar levam a degradação de membranas e consequentemente ao aumento do estresse oxidativo celular (Teixeira et al., 2020). Somado a isso, é comum a degradação de pigmentos fotossintéticos como clorofilas a e b, assim como a redução da eficiência do fotossistema, afetando a produção de colmos e de sacarose (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020).

Alternativas como o fornecimento preventivo de Si podem auxiliar na redução dos estresses ocasionados por seca em plantas (Chen et al., 2018), já que o elemento estimula o transporte hídrico na raiz através de um aumento na atividade das aquaporinas (Chen, et al., 2016b), levando ao maior aproveitamento da água absorvida. Somado a isso, o elemento atua no fortalecimento físico da parede celular, reduzindo a sua fluidez interna e consequente perda de eletrólitos, aumentando a proteção dos pigmentos e organelas fotossintéticas, melhorando assim, a atividade do fotossistema (Teixeira et al., 2020). Logo, acredita-se que a adubação silicatada estimule a produção de biomassa de plantas submetidas a ambientes estressores (Camargo et al., 2017; Camargo et al., 2019; Teixeira et al., 2020a, b).

A cana-de-açúcar pode acumular de 0,1 a 3,2% do elemento nas folhas, característica intrínseca de gramíneas (Ma, Miyake e Takahashi, 2001). Além

disso, a quantidade disponível do Si no solo é outro fator que define a absorção desse elemento. Em solos argilosos, a quantidade do elemento pode variar de 200 a 300 g kg⁻¹ de Si, já em solos arenosos, 450 g kg⁻¹ de Si (Kovda, 1973). Por outro lado, uma grande parcela do Si está na forma inerte no solo, ou seja, não disponível em solução para absorção pelas raízes (Epstein, 1994).

A escassez da forma assimilável de Si é frequente em regiões de clima tropical, onde os solos sofrem com constante dessilicação devido a lixiviação, baixo pH e saturação de base do solo (Keeping, 2017). Características de Latossolos e Neossolos, que são altamente intemperizados, e apresentam deficiência em Si (Savant et al., 1999; Meyer e Keeping, 2001). No caso da cana-de-açúcar, a deficiência de Si pode ocorrer quando o solo apresentar quantidade inferior a faixa de 10 a 20 mg kg⁻¹ de Si (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) (Berthelsen et al., 2002). Já de acordo com Marafon e Endres (2011), o solo é considerado limitante em Si para a cultura da cana-de-açúcar quando os teores estão abaixo da faixa de 6 a 8 mg kg⁻¹ (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹).

Consequentes colheitas e a não reposição de Si no solo, levam a um esgotamento que culmina em deficiência desse elemento (Yan et al., 2018). Logo, é interessante a realização de uma adubação silicatada com cautela na escolha da fonte, que somado ao fornecimento via água de irrigação, pode melhorar a disponibilização do elemento. Segundo Oliveira et al. (2007), a fertirrigação potencializa o aproveitamento do elemento por possuir maior eficiência e facilitar a absorção dos produtos fornecidos para as plantas.

Diante disto, questiona-se se o fornecimento do Si via água de irrigação é viável agronomicamente dependendo das diferentes texturas de solo utilizados no cultivo da cana-de-açúcar. A hipótese principal seria se o fornecimento de Si fertirrigado alivia os sintomas do déficit hídrico, reduzindo os efeitos deletérios nas variáveis fisiológicas, bioquímicas, nutricionais e de crescimento.

Na literatura, são ínfimos os resultados que versam sobre a interação entre a fertirrigação com Si e o déficit hídrico na cultura da cana-de-açúcar. Tampouco, na complexidade da interação em solos de classes texturais distintas, justificando-se a necessidade de novos estudos para elucidar essas informações.

2 Material e métodos

2.1 Local e condições de cultivo

Foram realizados três experimentos em estufa plástica agrícola na Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil com a cana-de-açúcar da variedade RB 962869, no período entre fevereiro a novembro de 2019. As condições de cultivo foram descritas conforme o capítulo 2 (item 2.1).

2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental escolhido para realização dos estudos com Neossolo Quartzarênico (NQ); Latossolo Vermelho eutroférico (LVe) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), foi realizado conforme descrito no capítulo 2 (item 2.2).

2.3 Características dos solos

O preparo, as análises químicas e físicas dos solos, bem como a adubação realizada foram descritos no capítulo 2 (item 2.3).

2.4 Manejo hídrico dos solos

As descrições quanto a avaliação da capacidade de campo dos solos estudados, bem como a descrição do sistema de controle de pesagem dos vasos foi realizado como citado no capítulo 2 (item 2.4).

2.5 Manejo da irrigação

O controle da variação diária da massa dos vasos, bem como o manejo da irrigação foram descritos conforme citado no capítulo 2 (item 2.5).

2.6 Silício

O manejo das aplicações de Si via fertirrigação foram descritos conforme o capítulo 2 (item 2.6).

2.7 Análises fisiológicas e de crescimento

As avaliações fisiológicas foram realizadas na cana-planta entre os 135 e 150 DAT e na cana-soca aos 135 e 150 DAC, no qual foram coletados os tecidos para mensuração dos estresses oxidativos e dos parâmetros biométricos na fase de cana-planta e na cana-soca, nas três classes de solo.

2.7.1 Eficiência quântica do fotossistema II

Utilizando-se o terço superior da primeira folha completamente expandida, foi estimada a eficiência do fotossistema II (PSII) a partir da fluorescência inicial (F0), fluorescência máxima (Fm) e eficiência quântica do fotossistema II (Fm/Fv), no período entre 8 e 9 horas da manhã. Na avaliação foi utilizado o Fluorometro (Opti-Science® - Os30P+).

2.7.2 Índice de extravasamento de eletrólitos

Para estimar o índice de extravasamento de eletrólitos (IEE%), as folhas foram previamente lavadas com água deionizada. Em seguida, dez discos de folhas (cada um com 6 mm de diâmetro) foram retirados e adicionados a béqueres com 20 mL de água deionizada, os quais foram mantidos à temperatura constante de 25 °C; após 2 horas, o extravasamento de eletrólito foi medido (EC1) usando um medidor de condutividade elétrica (medidor digital TDS-3). Posteriormente as amostras foram autoclavadas a 121 °C por 20 min e, após o resfriamento, foi realizada uma nova medição da condutividade elétrica (EC2). O índice foi determinado de acordo com a metodologia proposta por Dionisio-Sese e Tobita (1998), utilizando a equação: $(EC1 / EC2) \times 100$.

2.7.3 Conteúdo relativo de água

O conteúdo relativo de água (RWC) foi determinado em seis discos (cada um com 6 mm de diâmetro) de diferentes folhas das plantas de cana-de-açúcar. Primeiramente, os discos foram pesados em balança analítica para obtenção do peso fresco (PF). A seguir, as amostras foram colocadas em béqueres e hidratadas em 10 ml de água deionizada por 6 horas para obtenção do peso túrgido (PT). Por fim, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C por 48 horas, sendo novamente pesadas para obtenção do peso seco (PS). Os valores de CRA foram medidos pela equação proposta por González e González-Vilar (2001), seguindo a fórmula: $RWC = [(PF - PS) / (PT - PS)] \times 100$.

2.7.4 Potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi determinado no terço superior da folha +3, entre 4 e 6 horas da manhã (*pre-daw*). Foi utilizando uma câmara de pressão (Soil Moisture Equipment, EUA), seguindo a técnica descrita por Scholander et al. (1965). Aplicou-se pressão crescente utilizando-se o gás dinitrogênio (N_2) até a ocorrência da exsudação a partir do corte feito no pecíolo foliar (Turner, 1981).

2.7.5 Clorofila a e b

A clorofila total (clorofila a + b) e o teor de carotenoides foram mensurados a partir de discos com pesos entre 0,025 e 0,030 g de amostras frescas retiradas da primeira folha completamente expandida de cana-de-açúcar. As amostras foram adicionadas a tubos eppendoff contendo 1,5 ml de acetona a 80%, permanecendo ali até a folha ficar branca. Em seguida, as amostras foram medidas por espectrofotômetro de absorbância a 663 nm para clorofila a, 647 nm para clorofila b e 470 nm para carotenoides. As concentrações de clorofila e carotenoide foram determinadas seguindo a metodologia de Lichtenthaler e Wellburn (1983).

2.7.6 Conteúdo de prolina

A prolina livre nas plantas de cana-de-açúcar foi determinada em 0,5 g de amostras da terceira folha completamente expandida. O material vegetal foi macerado com ácido sulfossalicílico a 3% e adicionado em eppendorff com 2 mL de ácido acético glacial e 2 mL de ácido nihidrina. As amostras foram centrifugadas a 10.000 g por 15 min a 4 °C, seguido por banho quente a 100 °C por 1 h. Quando frias, adicionou-se 4 mL de tolueno. A concentração de prolina foi mensurada a 520 nm em espectrofotômetro (Beckman DU 640) e os cálculos expressos em $\mu\text{mol g}^{-1}$ de matéria fresca (MF), sendo estimada usando uma curva padrão, seguindo o método proposto por Bates et al. (1973).

2.7.7 Avaliações de crescimento

Nas canas-de-açúcar foram mensuradas a altura com auxílio de trena, e o número de perfilhos foi contado manualmente.

O diâmetro do colmo foi medido com paquímetro digital (Starrett®), com leitura feita a 10 cm da base da planta.

No ciclo de cana-planta e na cana-soca a parte aérea foi cortada para a avaliação.

Após as avaliações, as amostras foram lavadas com água deionizada, solução de detergente 0,1%, solução de HCl 0,3% e novamente com água deionizada, e secas em estufa de ar forçado à temperatura de $65^{\circ}\text{C} \pm 5$, até atingir peso constante. Após a secagem, foram obtidas a matéria seca da parte aérea (cana-planta e cana-soca), seguida da moagem em moinho Wiley.

2.7.8 Silício

Para determinação do teor de Si em folhas e colmo, seguiu-se a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004), conforme citado no capítulo 2 (item 2.7.11).

2.7.9 Avaliação estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise segundo descrito no capítulo 2 (item 2.7.12).

3 Resultados

3.1 Teor de silício em canas-de-açúcar cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico em cana-planta e cana-soca

O fornecimento de Si via fertirrigação aumentou o seu conteúdo tanto em cana-planta quanto em cana-soca cultivadas em NQ, LVe e LVd (Figura 2a-f), ao contrário dos tratamentos ausentes em Si (-Si), que apresentaram um menor conteúdo do elemento. Somado a isso, a restrição hídrica (35% da CRA) promoveu menor conteúdo de Si, comparado a planta controle (70% da CRA) (Figuras 2a-f).

O conteúdo de Si na cana-planta e na cana-soca também variou de acordo com o órgão da planta, sendo verificado maiores quantidades do elemento em folhas e menores no colmo, independente da classe de solo (Figuras 2a-f).

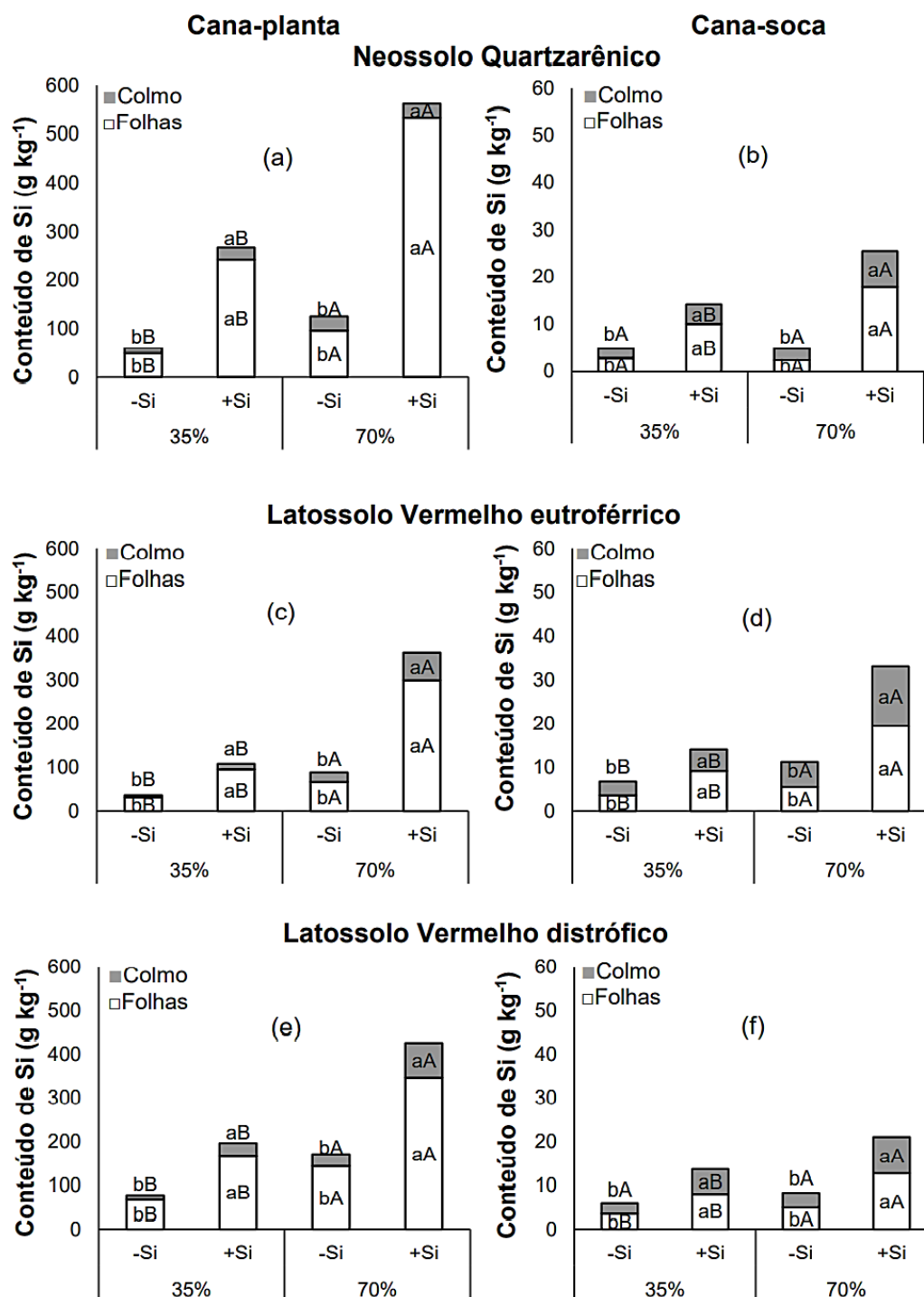


Figura 2. Conteúdo de silício (Si) em folhas e colmos da cana-planta (a) e da cana-soca (b) em Neossolo Quartzarênico; cana-planta (c) e cana-soca (d) em Latossolo Vermelho eutroférico; e cana-planta (e) e cana-soca (f) em Latossolo Vermelho distrófico, na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si

dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.2 Índice de extravasamento de eletrólitos e prolina

Nos cultivos realizados em NQ, LVe e LVd nos ciclos de cana-planta e cana-soca, o déficit hídrico de 35% da CRA comparado ao controle de 70% da CRA ocasionou um aumento no índice de extravasamento de eletrólitos e no conteúdo de prolina (Figuras 3a-l). Contudo, o fornecimento de Si aliviou o estresse por déficit hídrico, reduzindo os índices e extravasamento de eletrólitos e aumentando o conteúdo de prolina (Figuras 3a-l) em comparação aos tratamentos ausentes em Si. No tratamento controle de 70% da CRA, o Si reduziu o IEE% em cana-planta cultivada em LVe (Figuras 3e).

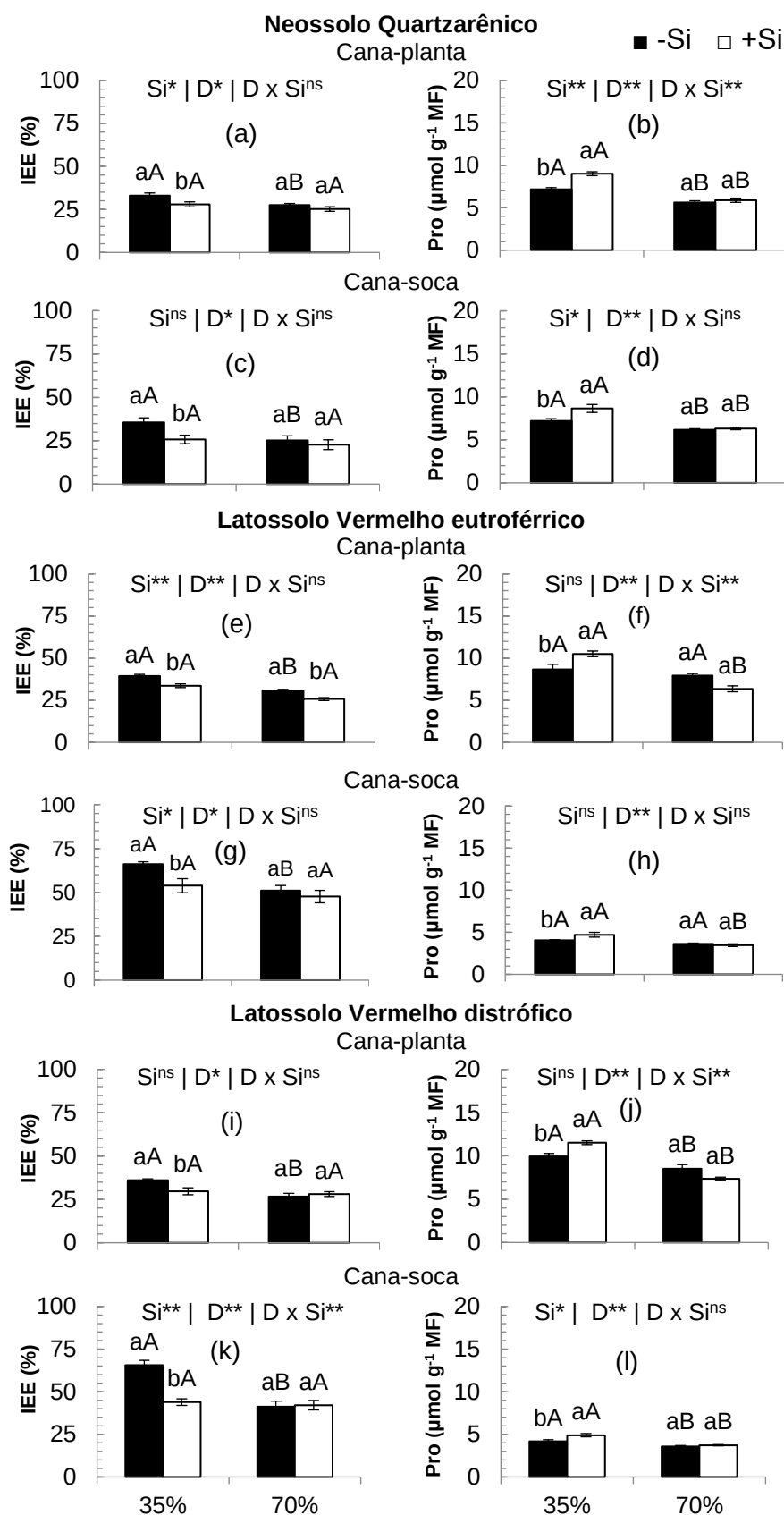


Figura 3. Índice de extravasamento de eletrólitos (IEE) (a) e prolina (Pro) (b) em cana-planta, índice de extravasamento de eletrólitos (c) e prolina (d) em cana-soca (Neossolo Quartzarênico); índice de extravasamento de eletrólitos (e) e prolina (f)

em cana-planta, índice de extravasamento de eletrólitos (g) e prolina (h) em cana-soca (Latossolo Vermelho eutroférico); índice de extravasamento de eletrólitos (i) e prolina (j) em cana-planta, índice de extravasamento de eletrólitos (k) e prolina (l) em cana-soca em (Latossolo Vermelho distrófico) de canas-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.3 Conteúdo relativo de água e potencial hídrico de plantas de cana-de-açúcar cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico em cana-planta e cana-soca

As canas-planta e as canas-soca cultivadas sob restrição hídrica de 35% da CRA que não foram fertirrigadas com Si, tiveram o seu status hídrico afetado, apresentando redução no conteúdo relativo de água e no potencial hídrico, comparado as plantas controle sob 70% da CRA nos três solos estudados (Figuras 4a-l). Por outro lado, a fertirrigação com Si em plantas sob restrição hídrica proporcionou maior conteúdo relativo de água e potencial hídrico (Figuras 4a-l) comparada as plantas que não receberam Si. Na fase de cana-soca, plantas controle cultivadas em NQ apresentaram maior conteúdo relativo de água quando tratadas com Si comparadas ao tratamento ausente (-Si) (Figura 4c).

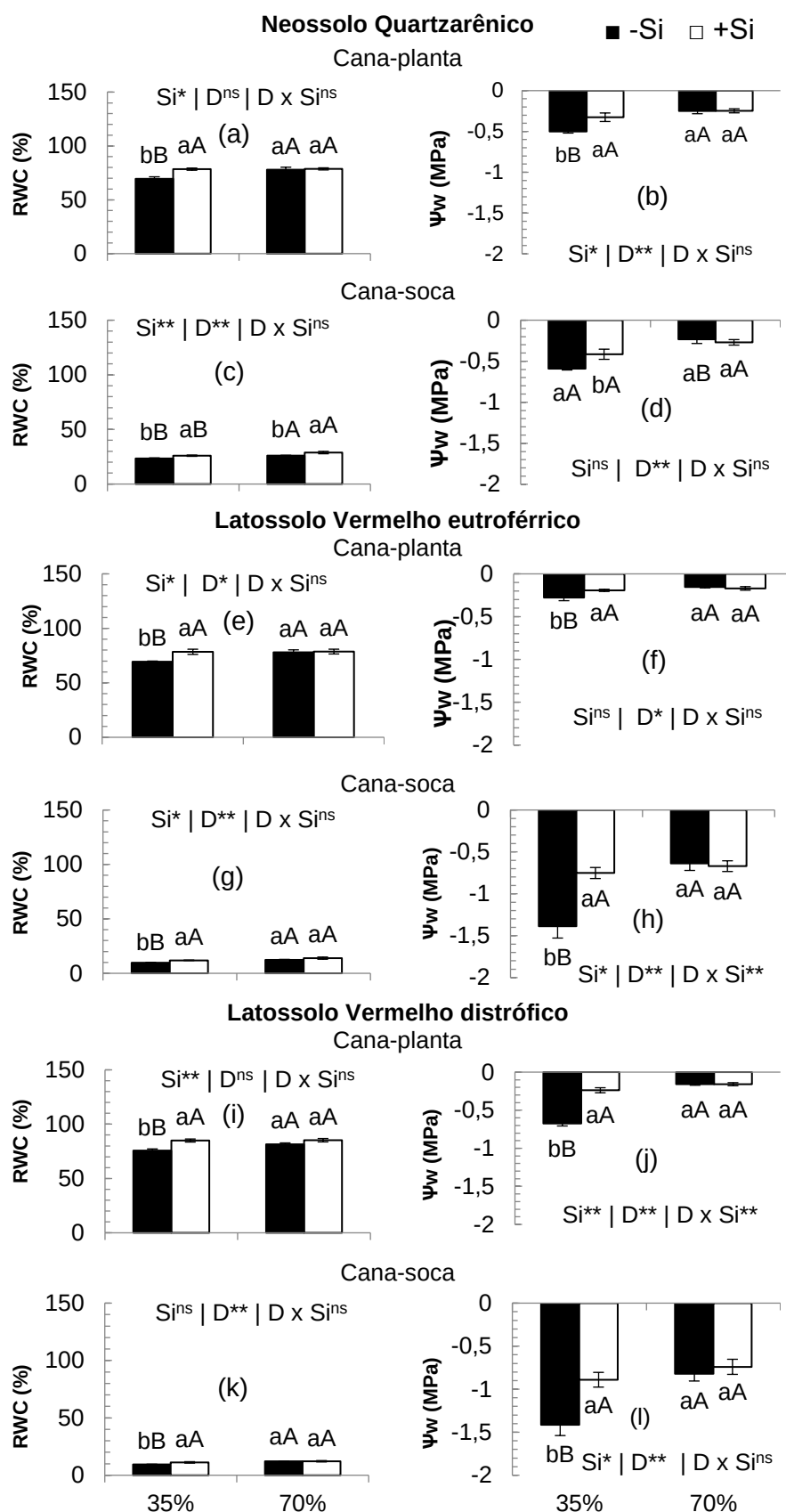


Figura 4. Conteúdo relativo de água (RWR) (a) e potencial hídrico foliar (Ψ_w) (b) em cana-planta, conteúdo relativo de água (c) e potencial hídrico foliar (d) em cana-soca (Neossolo Quartzarênico); conteúdo relativo de água (e) e potencial

hídrico foliar (f) em cana-planta, conteúdo relativo de água (g) e potencial hídrico foliar (h) em cana-soca (Latossolo Vermelho eutrófico); conteúdo relativo de água (i) e potencial hídrico foliar (j) em cana-planta, conteúdo relativo de água (k) e potencial hídrico foliar (l) em cana-soca (Latossolo Vermelho distrófico), na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.4 Fotossistema: fluorescência inicial (F0), fluorescência máxima (Fm) e eficiência quântica do fotossistema II (Fm/Fv)

O estresse por déficit hídrico em plantas 35% da CRA cultivadas em NQ, LVe e LVd aumentou a fluorescência inicial e a fluorescência máxima, e reduziu a relação fm/fv (Figuras 5a-r) comparado as plantas controle. Por outro lado, esse quadro foi revertido com o fornecimento de Si via fertirrigação (+Si), que reduziu a fluorescência inicial, a fluorescência máxima e aumentou a relação Fm/fv (Figuras 5a-r), comparado as plantas ausentes em Si, com exceção da fluorescência máxima de cana-soca cultivada em NQ (Figuras 5e) e LVe (Figuras 5k), que não diferiram quanto ao Si. Não houve diferença entre os tratamentos nas variáveis fluorescência inicial em cana-soca cultivada em NQ (Figura 5d) e LVd (Figura 5p), e na fluorescência máxima em cana-soca cultivada em LVd (Figuras 5q). O Si também aumentou a relação Fm/fv em cana-soca cultivada em LVd sob 70% da CRA (Figuras 5r).

■ -Si □ +Si

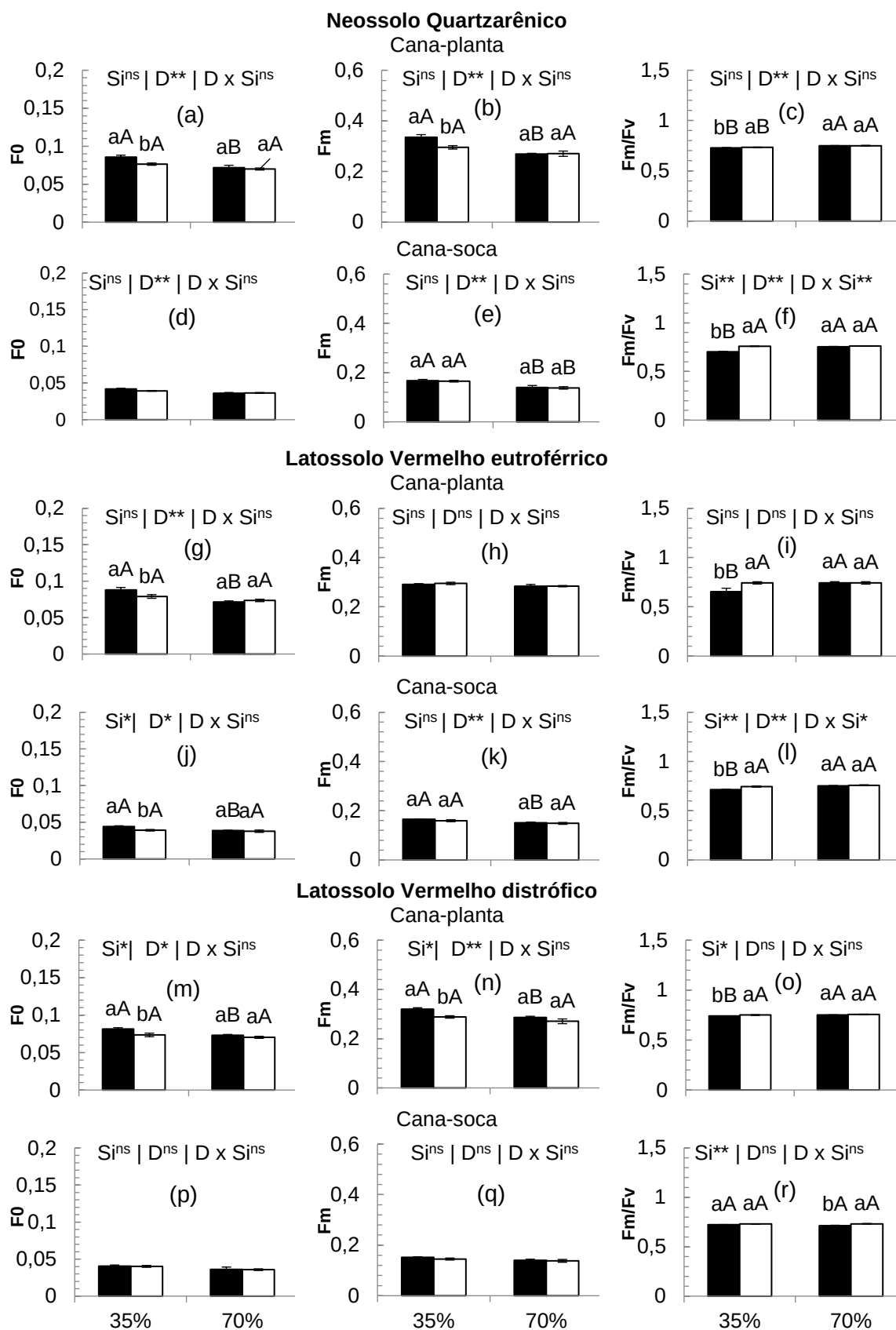


Figura 5. Fluorescência inicial (F_0) (a), fluorescência máxima (F_m) (b) e eficiência quântica do fotossistema II (f_m/F_v) (c) em cana-planta, fluorescência inicial (F_0) (d), fluorescência máxima (F_m) (e) e eficiência quântica do fotossistema II (f) em

cana-soca (Neossolo Quartzarênico); fluorescência inicial (F0) (g), fluorescência máxima (Fm) (h) e eficiência quântica do fotossistema II (i) em cana-planta, fluorescência inicial (F0) (j), fluorescência máxima (Fm) (l) e eficiência quântica do fotossistema II (m) em cana-soca (Latosolo Vermelho eutroférico); fluorescência inicial (F0) (n), fluorescência máxima (Fm) (o) e eficiência quântica do fotossistema II em cana-planta, fluorescência inicial (F0) (p), fluorescência máxima (Fm) (q) e eficiência quântica do fotossistema II (r) em cana-soca em (Latosolo Vermelho distrófico) de canas-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.5 Clorofila a e clorofila b em MPB cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico na fase de cana-planta e cana-soca

Em NQ, LVe e LVd, as plantas nos ciclos de cana-planta e de cana-soca sob restrição hídrica apresentaram redução dos conteúdos de clorofila a e clorofila b (Figuras 6a-l) comparado as plantas controle. Por outro lado, a fertirrigação com Si em plantas sob restrição hídrica proporcionou maior conteúdo desses pigmentos (Figuras 6a-l) comparada as plantas ausentes em Si, com exceção da cana-soca em LVd, no qual nem a clorofila a e nem a clorofila b não diferiram (Figuras 6k, l). O fornecimento de Si aumentou o conteúdo de clorofila a e b em plantas controle cultivadas sob 70% da CRA na fase de cana-soca em LVe (Figuras 6g, h).

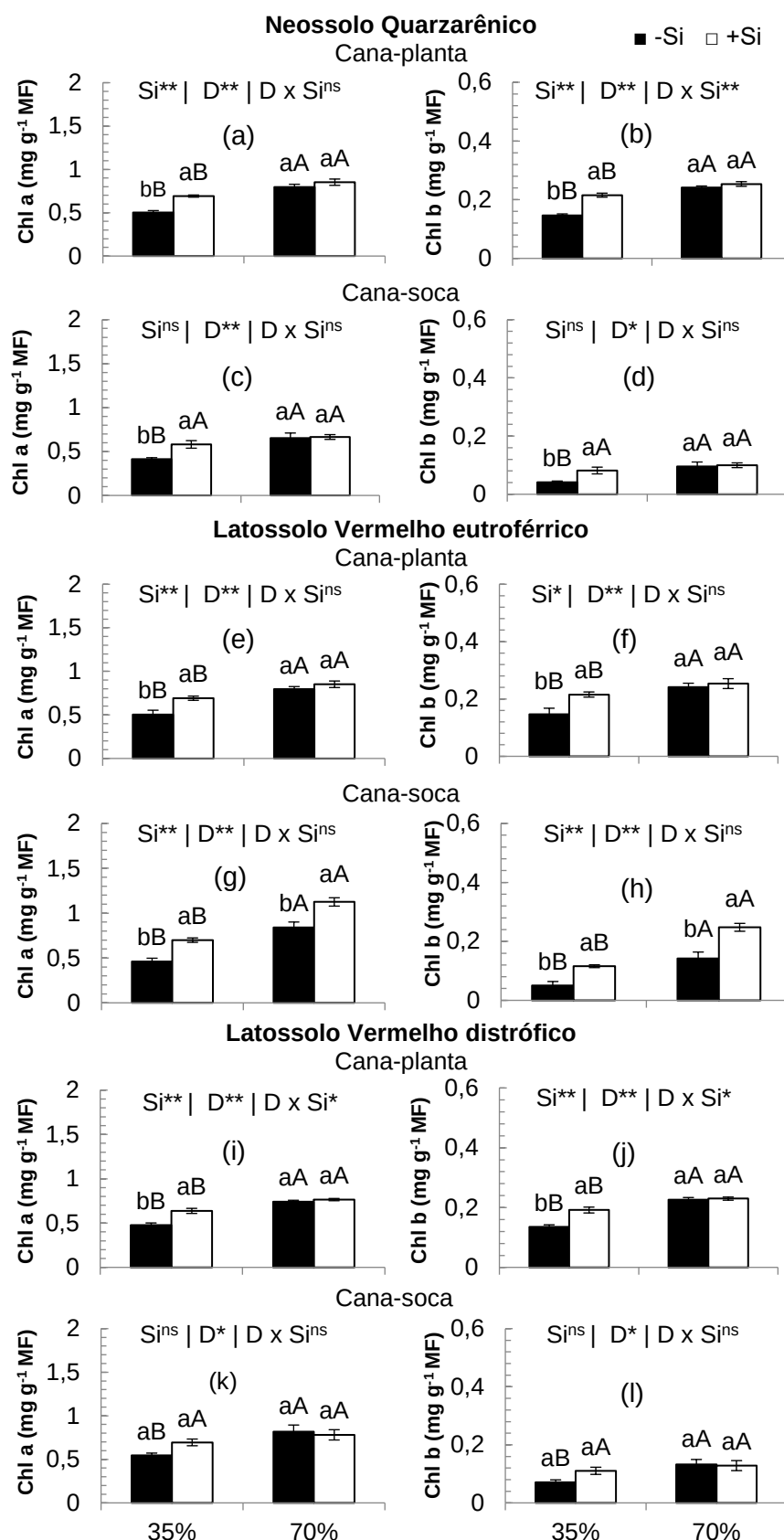


Figura 6. Clorofila a (Chl a) (a) e clorofila b (Chl b) (b) em cana-planta, clorofila a (c) e clorofila b (d) em cana-soca (Neossolo Quartzarênico); clorofila a (e) e clorofila b (f) em cana-planta, clorofila a (g) e clorofila b (h) em cana-soca (Latosso solo Vermelho eutroférico); clorofila a (i) e clorofila b (j) em cana-planta,

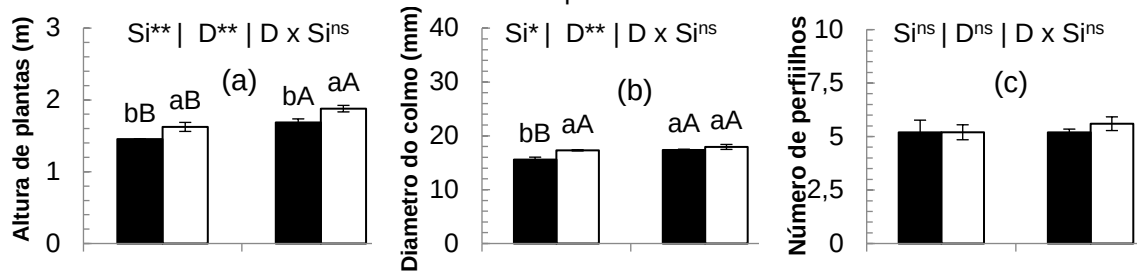
clorofila a (k) e clorofila b (l) em cana-soca (Latossolo Vermelho distrófico) de canas-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.6 Análise de crescimento: altura, diâmetro do colmo e número de perfilhos

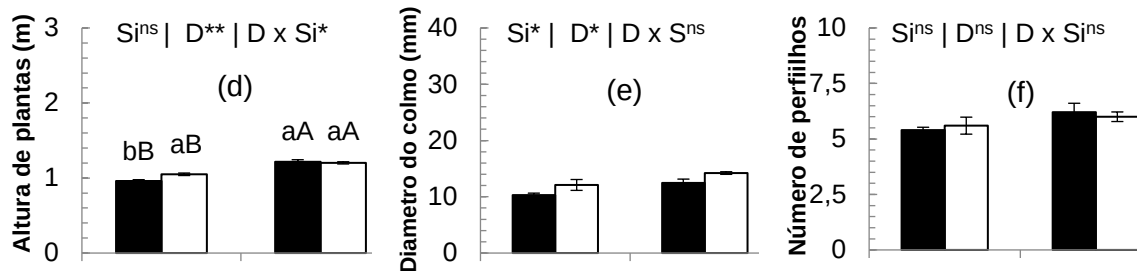
Como resposta a imposição do déficit hídrico de 35% da CRA em cana-planta e cana-soca em NQ, LVe e LVd, as plantas apresentaram redução na altura, no diâmetro do colmo e no número de perfilhos por planta (Figuras 7a-r) comparado ao tratamento com 70% da CRA. Entretanto, a fertirrigação com Si no tratamento 35% da CRA incrementou a altura, o diâmetro do colmo e o número de perfilhos (Figuras 7 a-r). Nos cultivos realizados em NQ, não houve diferença entre os tratamentos para o diâmetro de colmos na fase de cana-soca (Figuras 7e), e nem para o número de perfilhos em ambas as fases de cultivo (Figuras 7c, f). O Si fornecido em cana-planta sob 70% da CRA proporcionou um aumento a altura de plantas em NQ (Figuras 7a) e em LVd (Figuras 7m), assim como em número de perfilhos em LVd (Figuras 7o).

Neossolo Quartzarênico

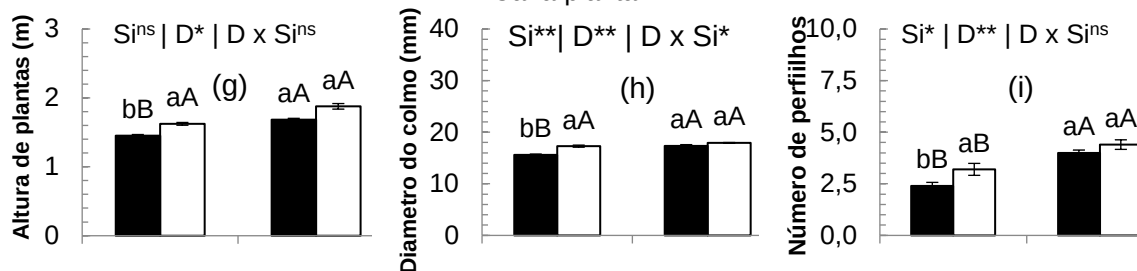
Cana-planta



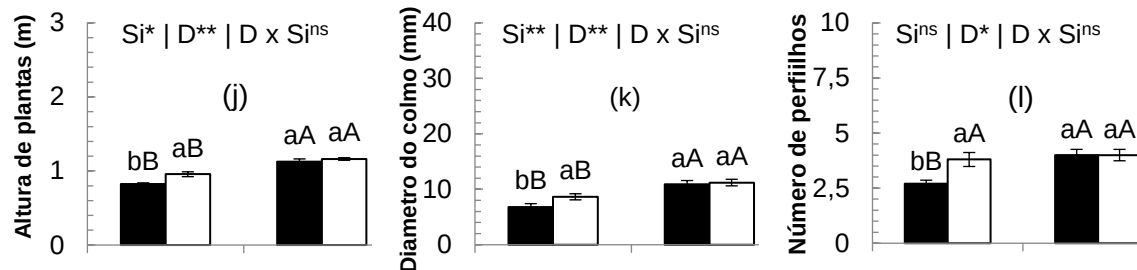
Cana-soca

**Latossolo Vermelho eutroférico**

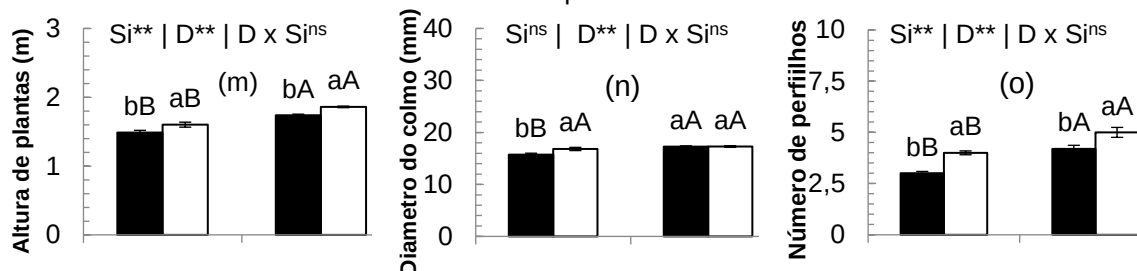
Cana-planta



Cana-soca

**Latossolo Vermelho distrófico**

Cana-planta



Cana-soca

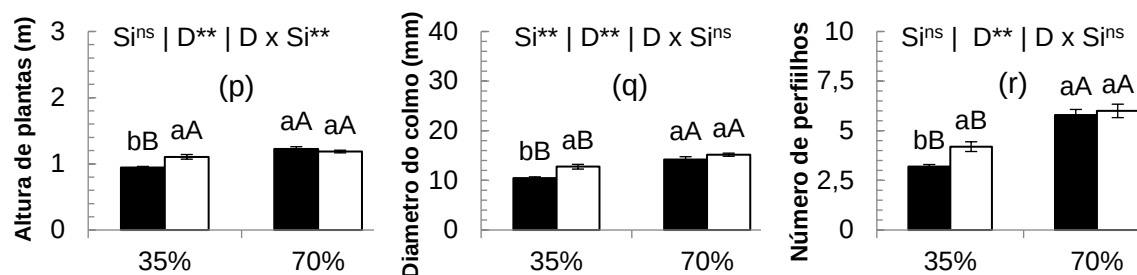


Figura 7. Altura de plantas (a), diâmetro de colmo (b) e número de perfilhos (c) em cana-planta, altura de plantas (d), diâmetro de colmo (e) e número de perfilhos (f) em cana-soca (Neossolo Quartzarênico); altura de plantas (g), diâmetro de colmo (h) e número de perfilhos (i) em cana-planta, altura de plantas (j), diâmetro de colmo (k) e número de perfilhos (l) em cana-soca (Latossolo Vermelho eutroférico); altura de plantas (m), diâmetro de colmo (n) e número de perfilhos (o) em cana-planta, altura de plantas (p), diâmetro de colmo (q) e número de perfilhos (r) em cana-soca em (Latossolo Vermelho distrófico) de canas-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

3.7 Massa seca da parte aérea de cana-planta e cana-soca em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo distrófico

As massas secas das partes aéreas (cana-planta e cana-soca) de cana-de-açúcar cultivadas em NQ, LVe e LVd foram menores nos tratamentos com 35% da CRA comparado ao controle de 70% da CRA (Figuras 8a-f). Em contrapartida, a fertirrigação silicatada favoreceu as plantas cultivadas em 35% da CRA, que apresentaram melhores resultados que as plantas no mesmo tratamento cultivadas na ausência de Si (Figuras 8a-f).

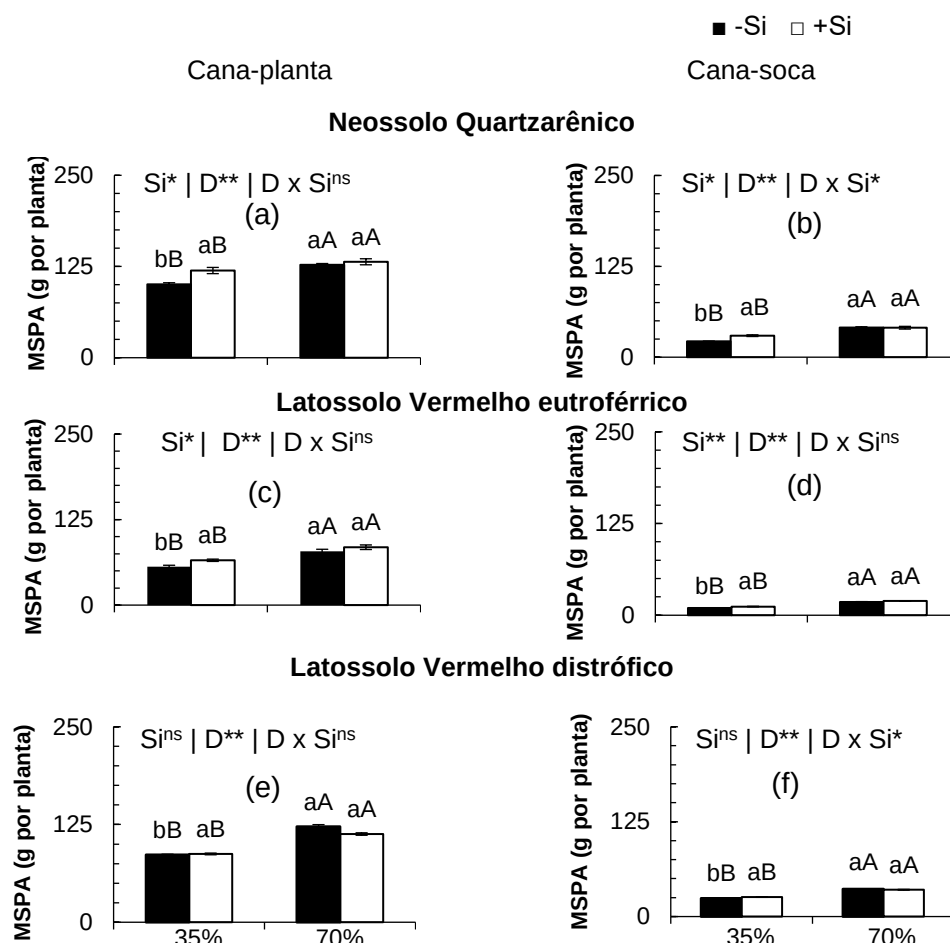


Figura 8. Massa seca da parte aérea (MSPA) em cana-planta (a), massa seca da parte aérea em cana-soca (b) (Neossolo Quartzarênico); massa seca da parte aérea em cana-planta (c), e massa seca da parte aérea em cana-soca (d) (Latossolo Vermelho eutroférico); massa seca da parte aérea em cana-planta (e), e massa seca da parte aérea em cana-soca (f) em (Latossolo Vermelho distrófico) de canas-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, D: déficit hídrico, D x Si: interação.

4 Discussão

O déficit hídrico ocasionado pelas chuvas irregulares é comum no Brasil, e períodos de secas na fase inicial de cultivo da cana-de-açúcar podem

ocasionar estresses que irão afetar a produção dos colmos (Camargo et al. 2019). Os efeitos da seca foram verificados nesse estudo, tanto na fase de cana-planta quanto na cana-soca em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho distrófico, no qual o tratamento 35% da CRA comparado ao controle (70% da CRA), ocasionou a redução das atividades fisiológicas e bioquímicas, e consequentemente prejudicou o desenvolvimento vegetativo e produção de matéria seca.

A fertirrigação silicatada em solos deficientes no elemento aumentou a concentração de Si solúvel no solo, resultando em um aumento do teor na parte aérea e no colmo tanto em cana-planta quanto na cana-soca, especialmente no tratamento 70% da CRA, pois a restrição hídrica imposta ao tratamento 35% da CRA levou a redução da absorção de Si por plantas de cana-de-açúcar em ambas as fases de cultivo, verificado no menor acúmulo do elemento (Figura 2a-f). Esse efeito ocorre devido as plantas necessitarem da água como veículo de transporte do elemento até as raízes, e sua restrição retarda esse processo, diminuindo a absorção (Prado, 2021).

Além dos fatores limitantes relacionados a restrição hídrica, os solos usados no desenvolvimento dessa pesquisa apresentaram teores de 1; 5 e 3 mg kg⁻¹ de Si (Tabela 1) respectivamente para NQ, LVe e LVd, sendo considerados limitantes no elemento para cultivo da cana-de-açúcar. De acordo com Berthelsen et al. (2002), os solos que apresentam teores abaixo da faixa de 10 a 20 mg kg⁻¹ de Si (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) são considerados abaixo dos níveis adequados, já Marafon e Endres (2011) indicam limitações quando os teores estão abaixo da faixa de 6 a 8 mg kg⁻¹ (em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹), ficando indisponíveis para a absorção pela cultura, sendo necessária a fertirrigação com fontes solúveis de Si, a fim de suplementar a solução do solo com H₄SiO₄.

A cana-de-açúcar é acumuladora de Si, o que justifica o efeito benéfico do elemento nesse experimento. O resultado positivo foi facilmente expresso nas plantas cultivadas nos três solos, devido tanto a classe dos Neossolos quanto dos Latossolos serem altamente intemperizadas, apresentarem alta lixiviação, acidez, e deficiência em Si (Savant et al., 1999; Meyer e Keeping, 2001).

Assim como verificado nesse estudo, em experimentos realizados por Teixeira et al. (2020a) e Camargo et al. (2019), a fertilização silicatada em

Neossolo Quartzarênico também aumentou o conteúdo de Si em canas-de-açúcar sob déficit hídrico. Resultado possível, devido a cultura ser acumuladora do elemento (Meyer e Keeping, 2001).

A imposição da restrição hídrica também resultou no aumento do estresse oxidativo, levado a produção excessiva de EROs, processo que danifica o DNA, proteínas, lipídios, carboidratos e nucleotídeos, aumentando a fluidez da membrana, causando destruição dos aparelhos fotossintéticos (Apel e Hirt, 2004). O aumento na fluidez da membrana e o excesso de EROs pode ser comprovado nesse estudo através do elevado índice de extravasamento de eletrólitos (Figura 3a, c, e, g, i, k), verificado em plantas de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico de 35% da CRA.

Por outro lado, o a fertirrigação com Si reduziu o IEE% nas plantas sob déficit hídrico, independente solo ou fase de cultivo (Figura 3a, c, e, g, i, k), possivelmente pelo aumento no teor de Si na parte aérea ter atuado como proteção às organelas fotossintéticas, aliviando a degradação celular (Sarah et al. 2021).

O déficit hídrico estimulou a produção de compostos antioxidantes de baixo peso molecular, como a prolina, assim como também observado por Teixeira et al. (2020) em MPB em situação de seca. Porém, quando tratadas com Si, plantas sob restrição hídrica apresentaram maior quantidade desse composto (Figura 3b, d, f, h, j, l), sugerindo que o elemento proporcionou aumento na tolerância ao estresse comparado as plantas cultivadas sob 35% da CRA sem adição de Si.

O aumento da prolina ocasionou uma maior tolerância a restrição hídrica, pois é um aminoácido que ajuda a manter o status de água em plantas que estão em situação de seca, atuando como um soluto compatível no ajuste osmótico celular. Esse aminoácido também protege a integridade das proteínas, estimulando a atividade de diferentes enzimas e na síntese de proteínas, controla funções mitocondriais, além de ajudar a eliminar EROs (Szabados; Savoure, 2010).

Foi observado que as canas-de-açúcar sob déficit hídrico quando tratadas com Si independente da classe de solo ou fase de cultivo, apresentaram maiores níveis de conteúdo relativo de água e maior potencial hídrico (Figura 4a-l) que plantas deficitárias não tratadas com elemento.

Resultados similares foram verificados por Teixeira et al. (2020a), em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico de 30% da CRA, e Camargo et al. (2019), em cultivares de cana-de-açúcar sob regime de seca. Ambos os autores observaram que o fornecimento de Si incrementou o status hídrico da cana-de-açúcar, aumentando conteúdo relativo de água e o potencial hídrico.

As canas-de-açúcar sob déficit hídrico apresentam melhora em seu status hídrico quando tratadas com Si, ocasionado não só pelo aumento do conteúdo de osmorreguladores como a prolina (Figura 3b, d, f, h, j, l), mas também pelo elemento estimular a atividade das aquaporinas, que são proteínas responsáveis pelo transporte da água em plantas. Isso ocorre, pois o Si aumenta a expressão dos genes (PIPs), presentes na membrana plasmática das aquaporinas (Chen et al. 2018). Além disso, o Si pode favorecer a absorção e acúmulo de nutrientes como K, que atua como regulador da pressão osmótica, na abertura e fechamento dos estômatos, controlando as perdas de água por transpiração foliar, como observado em outras monocotiledôneas a exemplo do sorgo por Chen et al. (2016) e milho por Sarah et al. (2021).

O déficit hídrico em cana-planta e cana-soca aumentou as taxas de F_0 e F_m e reduziu a relação F_v / F_m (Figura 5), sendo um sinal da ocorrência de danos nos centros de reação do fotossistema II. A baixa absorção de água pode levar ao fechamento estomático e afetar a captação de CO_2 , diminuindo a concentração intercelular nas folhas (Deell e Toivonen, 2003). Somado a isso, o estresse afeta o complexo de desenvolvimento de oxigênio e desfavorece a transferência da energia de excitação da antena para os centros de reação, resultando em sobrecarga de elétrons nos fotossistemas (Bolhàr-Nordenkamp et al, 1989; Naumann et al., 2010).

Por outro lado, a influência do Si na manutenção do status hídrico (Figura 4) visualizados nesse estudo, favoreceram a atividade do PSII, reduzindo o F_0 e F_m , além de aumentar a razão F_v / F_m nos tratamentos +Si35% comparado aos -Si35%. Ao induzirem um estresse de 30% da CRA em MPB de cana-de-açúcar, autores como Teixeira et al. (2020), verificaram uma redução na relação F_v / F_m , porém essa situação foi revertida com o

fornecimento de 2 mmol L⁻¹ de Si via radicular, que aumentou a relação Fv/Fm, equiparando-se a plantas cultivadas com 70% e 50% da CRA.

O déficit hídrico em plantas ocasiona a degradação dos pigmentos fotossintéticos, porém, o fornecimento de Si em cana-de-açúcar sob déficit hídrico evitou a degradação, possibilitando a manutenção dos conteúdos de clorofila a e clorofila b (Figura 6), tanto na fase de cana-planta quanto na cana-soca.

O Si quando absorvido é depositado na parede celular e nos espaços intercelulares na forma de sílica amorfa, que leva a uma alteração das propriedades físicas e mecânicas das organelas foliares, possibilitando a preservação dos pigmentos (Ma, 2004; Ma; Yamaji, 2006; Camargo et al. 2019). Em estudos realizados com mudas de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico de 30% da CRA, Teixeira et al. (2020) também verificaram que a fertirrigação silicatada aumentou os teores de clorofila a e clorofila b comparado a plantas não tratadas com Si.

O déficit hídrico afetou o status hídrico, o potencial fotossintético, aumentando o estresse oxidativo, culminando em menor e o desenvolvimento vegetativo e prejuízos na produção de massa seca. Respostas similares também foram observadas por Jangpromma et al. (2012), que ao avaliarem o crescimento de dez genótipos de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico, verificaram uma redução no diâmetro do caule e na produção de biomassa.

Plantas sob déficit hídrico podem usar como mecanismo de sobrevivência a redução de formação de folhas e área foliar, com finalidade de controlar a taxa de transpiração, evitando a perda de água para a atmosfera (Chen et al. 2018). Isso justifica o menor desenvolvimento da parte aérea e menor número de perfilhos. Além disso, a baixa disponibilidade de água leva a redução no diâmetro dos colmos, como verificado por Teixeira et al. (2020).

Os efeitos deletérios do déficit hídrico imposto de 35% da CRA foram aliviados com o fornecimento de Si via fertirrigação, proporcionando maior crescimento vegetal, verificado em maior altura, diâmetro de colmo e número de perfilhos (Figura 7), bem como a massa seca da parte aérea (Figura 8).

O incremento no desenvolvimento das plantas foi possível devido ao Si atenuar os estresses ocasionados pelo déficit hídrico, que proporcionando

maior hidratação dos tecidos vegetais, melhorando a atividade do PSII e reduzindo o estresse oxidativo verificado pela menor IEE%.

Autores como Camargo et al. (2019), que avaliando efeitos da adubação silicatada e o déficit hídrico imposto durante duas safras de cultivares de cana-de-açúcar, verificaram que o elemento benéfico proporcionou maior desempenho fisiológico, que resultou em aumento no peso seco da cana-de-açúcar.

O fornecimento de Si para cana-de-açúcar é benéfico, pois além de estimular o melhor desenvolvimento de biomassa, melhora a qualidade de colmos, como observado em estudos realizados com duas cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao déficit em diferentes estádios de desenvolvimento, que ao receberem o fornecimento de 600 kg ha⁻¹ de Si pela via radicular na fonte de silicato de cálcio e magnésio, Camargo et al. (2017) verificaram que as plantas apresentaram melhores níveis de açúcar, produtividade de colmos e biomassa seca.

O efeito deletério do déficit hídrico em cana-de-açúcar foi aliviado com o fornecimento da concentração de 1,8 mmol L⁻¹ de Si via fertirrigação, que levou a um aumento do teor do elemento benéfico nas plantas, tanto na fase de cana-planta quanto na cana-soca, nas três classes de solos estudadas.

5 Conclusão

O silício fornecido via fertirrigação é eficiente no alívio dos estresses ocasionados pelo déficit hídrico em canas-de-açúcar cultivadas em Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho eutrófico e Latossolo Vermelho distrófico tanto na fase de cana-planta quanto na cana-soca.

Em solos deficitários em silício, o fornecimento do elemento melhora o status hídrico, protege o aparato fotossintético e reduz a peroxidação da membrana de mudas de cana-de-açúcar, reduzindo os estresses por seca, resultando em maior produção de biomassa.

6 Referências

Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, Karanov E (2001) The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment** 24:1337–1344. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>

Apel K, Hirt H (2004) Reactive oxygen species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction. **Annual Review of Plant Biology** 55:373-399. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701>

Bates LS, Waldren RP, Teare ID (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and soil** 39:205-207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

Bernardo S, Mantovani EC, Soares AA (Ed)(2008) **Manual de Irrigação**, Viçosa, UFV, 611p.

Bolhar-Nordenkampf HR, Long SP, Baker NR, Oquist G, Schreiber ULEG, Lechner EG (1989) Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrumentation. **Functional Ecology** 497-514. <https://doi.org/10.2307/2389624>

Camargo MS, Bezerra BKL, Holanda LA, Oliveira AL, Vitti AC, Silva M A (2019) Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19:81–9. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>

Carvalho RF, Quecini V, Peres LEP (2010) Hormonal modulation of photomorphogenesis-controlled anthocyanin accumulation in tomato (*Solanum lycopersicum* L. cv Micro Tom) hypocotyls: **Physiological and genetic studies.** **Plant Science** 178:258-265. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.01.013>

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports** 6:1-14. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

Chen D, Wang S, Yin L, Deng X (2018) How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency?. **Frontiers in plant science** 9:281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>

Deell JR, Toivonen PM (Ed.) (2003) **Practical applications of chlorophyll fluorescence in plant biology**. Springer Science & Business Media.

Dionisio-Sese ML, Tobita S (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science** 135:1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)

Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA** 91:11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>

Foyer CH, Leiadais M, Kunert KJ (1994) Special review Photooxidative stress in plants. **Physiologia plantarum** 92:696-717. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb03042.x>

González L, González-Vilar M (Ed)(2001) Determination of relative water content, in Reigosa, M. J.: **Handbook of plant ecophysiology techniques**. Dordrecht: Kluwer Academic 207–212. https://doi.org/10.1007/0-306-48057-3_14

Gratão PL, Monteiro CC, Carvalho RF, Tezotto T, Piotto FA, Peres LEP, Azevedo RA (2012) Biochemical dissection of diageotropica and never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry** 56:79–96. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.009>

Jangpromma N, Thammasirak S, Jaisil P, Songsri P (2012) Effects of drought and recovery from drought stress on above ground and root growth, and water use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Australian Journal of Crop Science** 6:1298–1304

Keeping MG (2017) Uptake of silicon by sugarcane from applied sources may not reflect plant-available soil silicon and total silicon content of sources. **Frontiers in Plant Science** 8:1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (Eds) (2004) **Análise de silício no solo, planta e fertilizantes**. Uberlândia: UFU, 50p.

Kovda VA (Ed)(1973) **The bases of learning about soils**, 2. Nauka, Moscow
 Landi M, Tattini M, Gould KS (2015) Multiple functional roles of anthocyanins in plant-environment interactions. **Environmental and Experimental Botany** 119:4–17. doi:10.1016/j.envexpbot.2015.05.012

Lichtenthaler HK, Wellburn AR (1983) Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. **Biochemical Society Transactions** 603:591–592, 1983

Ma JF (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition** 50:11-18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>

Ma JF, Miyake Y, Takahashi E (2001) Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in plant Science** 8:17-39. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9)

Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science** 11: 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

Meyer JH, Keeping MG (Ed)(2001) Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndorfer GH. **Silicon in Agriculture**. Elsevier, Amsterdam, 257–275.

Naumann JC, Bissett SN, Young DR, Edwards J, Anderson JE (2010) Diurnal patterns of photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and PRI to evaluate water stress in the invasive species, *Elaeagnus umbellata* Thunb. **Trees** 24:237-245. <https://doi.org/10.1007/s00468-009-0394-0>

Oliveira SL, Coelho EF, Borges AL (Ed)(2007) **Irrigação e fertirrigação**. Frutas do Brasil - Banana Produção, 1.

Peters JL, Van-Tuinen A, Adamse P, Kendrick RE, Koornneef M (1989) High pigment mutants of tomato exhibit high sensitivity for phytochrome action. **Journal of Plant Physiology** 135:661-666. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(89\)80024-0](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(89)80024-0)

Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (Eds.) (1997) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC.

Sarah MMS, Prado RM, Teixeira GCM, de Souza Júnior JP, de Medeiros RLS, Barreto RF (2021) Silicon Supplied Via Roots or Leaves Relieves Potassium Deficiency in Maize Plants. **Silicon** 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00908-1>

Savant NK, Korndorfer GH, Datnoff LE, Snyder GH (1999) Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition** 22:1853–1903. <https://doi.org/10.1080/01904169909365761>

Scholander PF, Bradstreet ED, Hemmingsen EA, Hammel HT (1965) Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science** 148:339-346. <https://doi.org/10.1126/science.148.3668.339>

Szabados L, Saviouré A (2010) Proline: a multifunctional amino acid. **Trends in Plant Science** 15:89–97. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.11.009>

Teixeira GCM, de Mello Prado R, Rocha AMS, dos Santos LCN, dos 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** 20: 849-859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

Teixeira GCM, Rocha AMS, Oliveira KS, dos Santos Sarah MM, de Oliveira Filho ASB, Prado RM Palaretti LF (2020) Silício na mitigação dos estresses por deficiência de manganês e pelo déficit hídrico em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar. **Científica** 48:170-187. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p170-187>

Turner NC (1981) Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant Soil** 58:339–366. <https://doi.org/10.1007/BF02180062>

Yan GC, Nikolic M, Ye MJ, Xiao ZX, Liang YC (2018) Silicon acquisition and accumulation in plant and its significance for agriculture. **Journal of Integrative Agriculture** 17:2138-2150. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62037-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62037-4)

Wang H, Li C, Liang Y (2001) **Agricultural utilization of silicon in China**. In Studies in plant science (Vol. 8, pp. 343-358). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80025-2](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80025-2)

Zanão Jr. LA, Fontes RLF, Ávila VT (2010) Aplicação do silício para aumentar a resistência do arroz à mancha-parda. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:203-206. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000200013>

CAPÍTULO 4 - A fertirrigação silicatada via sistema de gotejo subsuperficial melhora o desenvolvimento de plantas de cana-de-açúcar cultivadas sob restrição hídrica

RESUMO: O uso de irrigação em cana-de-açúcar visa evitar o déficit hídrico, além de servir como veículo para fornecimento de nutrientes. Neste contexto, o fornecimento de silício (Si) pode minimizar os efeitos deletérios do estresse hídrico. A partir disso, foi desenvolvido um experimento em campo, utilizando-se mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em esquema de faixas (Slip-block), sendo os tratamentos divididos em capacidades de retenção de água no solo (CRA): mantida a 70% (controle sem restrição hídrica), 35% (restrição hídrica) e 10% (semi-sequeiro); e duas condições de Si: ausência (0 mmol L⁻¹) e presença (1,8 mmol L⁻¹) de Si fornecido via fertirrigação. As plantas cultivadas sob o semi-sequeiro (10% da CRA) e restrição hídrica (35% da CRA) em comparação as plantas com 70% da CRA sem adição de Si, apresentaram menor altura, número de colmos e diâmetro, resultando respectivamente em 30% e 13% menor produtividade comparada as plantas do tratamento 70% da CRA. Por outro lado, o Si via fertirrigação melhorou o desenvolvimento biométrico, e a produtividade aumentou em 15% e 13% respectivamente nas plantas com 10% e 35% da CRA comparado as plantas ausentes em Si (-Si). A maior disponibilidade de água no tratamento 70% da CRA reduziu os parâmetros de qualidade comparada aos tratamentos deficitários de 10% e 35% da CRA. Logo, o uso da irrigação juntamente ao fornecimento de Si melhora o desenvolvimento do plantio de cana-de-açúcar em situação de seca, porém reduz os teores de sólidos solúveis (Brix) e o açúcar total recuperável (ATR).

Palavras-chave: estresse hídrico; irrigação; elemento benéfico, *Saccharum officinarum* L.

Silicate fertigation via subsurface drip system improves the development of sugarcane plants grown in water-restricted conditions

ABSTRACT: The use of irrigation in sugarcane aims to avoid water restriction, in addition to serving as a vehicle for nutrient supply. In this context, the supply of silicon (Si) can minimize the deleterious effects of water stress. Based on this, a field experiment was carried out, using pre-sprouted sugarcane seedlings in a slip-block scheme, the treatments being divided into soil water regimes (SWR): maintained at 70% (control without water restriction), 35% (water restriction) and 10% (semi-irrigated); and two Si conditions: absence (0 mmol L^{-1}) and presence (1.8 mmol L^{-1}) of Si supplied via fertigation. Plants grown under semi-irrigated (10% SWR) and water restriction (35% SWR) without the addition of Si had lower height, number of stems and diameter, resulting in 30.38% and 13.77% respective reduction of productivity compared to plants treated with 70% of SWR. On the other hand, Si via fertigation improved biometric development, and productivity increased by 15.43% and 13.74%, respectively, in plants with 10% and 35% WRC. The greater availability of water in the treatment 70% SWR reduced the quality parameters compared to the treatments deficient at 10% and 35% SWR. Therefore, the use of irrigation together with Si supply improves the planting of sugarcane in drought conditions but reduces the levels of soluble solids (Brix) and total recoverable sugar (ATR).

Keywords: beneficial element; water deficit stress; irrigation; *Saccharum officinarum* L.

1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), assim como de açúcar e etanol (Nocelli et al., 2017). Seu cultivo em condições edafoclimáticas tropicais requer o aporte de valores médios entre 1095 e 1595 mm/safra e ETo média diária entre 3,5 e 4,1 mm dia⁻¹, dependendo do tempo de ciclo da cultura (Avilez et al., 2018).

A variação nas distribuições de chuvas, intensificada com as mudanças climáticas e ambientais (Zhao e Li, 2015), impõem restrição hídrica à cana-de-açúcar, causando prejuízos ao desenvolvimento do canavial, principalmente durante as fases iniciais de crescimento, como o perfilhamento e o crescimento de colmos (Jadoski et al., 2010).

Esse fato se intensifica se o sistema de plantio adotado for por mudas pré-brotadas (MPB), que inicialmente necessitam de grande quantidade de água para sobrevivência das mudas no campo (Martins et al., 2015).

O estresse por restrição hídrica leva a menor captação de água pelas plantas, reduzindo a área foliar (Teixeira et al., 2020), que resulta em menor captação da luz solar, e menor número de folhas emergentes, processo que pode variar de acordo com o potencial genético de cada cultivar (Rodolfo Júnior et al., 2016; Teixeira et al., 2021b). Somado a isso, há redução na altura de plantas (Machado et al., 2009), no perfilhamento e no diâmetro de colmos (Camargo et al., 2017), limitando o crescimento das plantas e reduzindo a produtividade.

A irrigação do canavial é uma estratégia promissora e o uso de sistemas de aplicação localizada, como o gotejamento subsuperficial, uma opção para manter a produção de colmos elevada (Coelho et al., 2018). Além do mais, o gotejamento possibilita a fertirrigação, prática que ajuda no fornecimento de elementos via água de irrigação, permitindo a distribuição e parcelamento de fertilizantes, reduzindo as perdas por lixiviação (Oliveira et al., 2007; Coelho et al., 2018), melhorando a eficiência da nutrição do vegetal.

Neste contexto, a aplicação de Si, vai ao encontro da redução dos efeitos deletérios ocasionados pela restrição hídrica em plantas (Chen et al., 2018). Esse elemento benéfico é absorvido na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄) pelas raízes (Epstein, 1999) e transportado até a parte aérea, onde é depositado na forma de sílica amorfa no tecido epidérmico, na parede celular e

nos espaços intercelulares (Ma, 2004; Ma e Yamaji, 2006; Epstein, 1999), formando uma barreira física à perda de água.

Além de evitar a perda de água pelas folhas, Chen et al. (2016) citam que o Si estimula a absorção de água, por promover o aumento na atividade das aquaporinas, proteínas responsáveis pelo transporte hídrico em plantas, e que podem ter a expressão de seus genes (PIPs) estimulada pelo elemento. Somado a isso, Camargo et al. (2017) citam que a absorção de Si aumenta a capacidade fotossintética, a produção de colmos e açúcar, e reduz os danos causados por doenças, insetos e salinidade.

A partir disso, a hipótese desse trabalho é que o Si pode atenuar os estresses ocasionados por restrição hídrica em plantas de cana-de-açúcar cultivadas em diferentes níveis de CRA do solo, melhorando o desempenho e aumentando a produtividade. Em adição, sabe-se que usinas tem áreas irrigadas e não irrigadas, e logo surge a seguinte pergunta: o Si é mais bem empregado em áreas sob restrição hídrica próxima de 35% da CRA ou em áreas irrigadas com 70% da CRA? Para isso, objetivou-se avaliar se o fornecimento de Si via fertirrigação em sistema de gotejamento subsuperficial ao longo do cultivo é viável agronomicamente e se pode ser usado como estratégia a redução do déficit hídrico em cana-de-açúcar.

2 Material e métodos

2.1 Área de cultivo

A pesquisa foi realizada na Fazenda Experimental de Ensino, Pesquisa e Extensão, no setor de irrigação, da Universidade Estadual Paulista (Unesp-FCAV), no campus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil, localizada a 21°14'50.4"S 48°17'00.4"O, e 570 m de altitude.

O clima, segundo a classificação climática de Köppen (1948), é do tipo Aw tropical (clima tropical com inverno seco), com precipitação média anual de 1.425 mm, e temperatura média anual de 21,7 °C.

2.2 Condições de plantio

Numa área de 500 m² (25 x 20 m) foram transplantadas mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar comum (*Saccharum officinarum* spp.), cultivar RB 962869 espaçadas de 0,65 m entre plantas e 1,5 m entre linhas.

O transplântio ocorreu em junho de 2020, coincidindo com a estação seca (maio-agosto) na região sudeste do Brasil, como forma de assegurar a ocorrência de estresse hídrico nas fases iniciais de desenvolvimento da cultura (estabelecimento inicial e perfilhamento).

2.3 Esquema experimental

O experimento foi realizado em faixas (Slip-block), com os tratamentos em função da capacidade de retenção de água no solo (CRA): mantida a 70% (controle sem restrição hídrica), 35% (restrição hídrica) e 10% (semi-sequeiro); e duas condições de Si: ausência (0 mmol L^{-1}) e presença ($1,8 \text{ mmol L}^{-1}$) de Si (Apêndice 2).

Cada linha de plantas foi irrigada por uma linha de gotejo subsuperficial que correspondia a um tratamento. A divisão de cada linha originou 4 blocos de $5,2 \text{ m}^2$ com oito plantas, das quais as quatro internas foram consideradas úteis e usadas para as avaliações, e as demais como bordadura. Os blocos dentro da linha de gotejo foram separados por um espaçamento de 2 metros.

2.4 Manejo do solo e adubação

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (Santos et al., 2018). Para realização da análise química e física, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 – 20 e de 20 – 40 cm, em área total.

As amostras de solo foram submetidas a análise química, seguindo os métodos descritos por Raij et al. (2001), e as físicas e granulométricas foram realizadas de acordo com o manual de métodos de análise de solo da Embrapa (Donagema et al., 2011). Os resultados foram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas, granulométricas e físicas de um Latossolo Vermelho eutroférrico (LVe) coletado nas camadas de 0-20 e 20-40 cm.

Solo	pH	M.O	P	S	Ca	Mg	K	Al	H+Al	CTC	V%	m%	Si	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³						mg kg ⁻¹					
0-20	6,1	22	57	6	39	16	3,7	0	21	80	73	0	11	0,45	5,0	9	37	2,1
20-40	6,4	17	31	7	36	15	3,6	0	18	73	75	0	9	0,24	4,3	7	24	0,8
	Argila		Silte		Areia		Areia grossa		Areia fina									
0-20	60,3		25		14,7		6,9		7,8									
20-40	60,7		25,7		13,6		6,4		7,2									

pH - em CaCl₂ por potenciometria; H+Al - em tampão SMP por potenciometria; - M.O - por espectrofotometria; P - em resina por espectrofotometria; S - por turbidimetria; Ca - por espectrometria de absorção atômica; Mg - por espectrometria de absorção atômica; Na - por espectrometria de absorção atômica; K - por espectrometria de absorção atômica; Si - em cloreto de cálcio a 0,01 mol L⁻¹; Al - em KCl por titulometria; S.B. = Ca+Mg+Na+K; CTC = S.B+H+Al; V% = (SB/CTC)* 100; m% = (Al/(SB+Al))*100; B pelo método da azometina-H por espectrofotometria; Cu, Fe, Mn, Zn - em solução DTPA por espectrometria de absorção atômica.

A área é historicamente cultivada com grãos, e o preparo foi iniciado com a desfragmentação mecânica de restos vegetais seguido por duas gradagens e sulcada a 40 cm de profundidade. De posse dos resultados da análise química (Tabela 1), a fertilidade foi corrigida seguindo o Boletim 100 (Raij et al., 1997), com aplicação de 67 kg ha⁻¹ de ureia (45% de N), 134 kg ha⁻¹ de KCl (60% de K₂O) e 244 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo (41% de P₂O₅).

Após 15 DAT, foi feita a fertirrigação com 5 mg dm⁻³ de Zn, na forma de sulfato de zinco e 2 mg dm⁻³ de B na forma de ácido bórico.

Aos 90 DAT foi feita a fertirrigação com 100 kg ha⁻¹ de ureia e 67 kg ha⁻¹ de KCl.

2.5 Manejo do silício

As plantas tratadas com elemento benéfico receberam 1,8 mmol L⁻¹ de Si na forma de silicato de sódio neutro (SNaN) (8,9% de Na₂O; 28% de SiO₂ e densidade (g L⁻¹) de 1,4) da *Diatom Mineração*®. O valor pH da solução com Si

foi mantido entre 5,5 e 6,5, sendo ajustado com solução de NaOH (1 mmol L⁻¹) e HCl (1 mmol L⁻¹).

As aplicações de Si foram realizadas cinco vezes ao longo do cultivo via fertirrigação. As duas primeiras aplicações ocorreram durante a fase de perfilhamento, aos 98 e 140 DAT, e as três últimas ao longo da fase de crescimento de colmos, aos 175, 228 e 253 DAT.

As aplicações foram distribuídas de forma que não fosse ultrapassada a quantidade de 20 L ha⁻¹ de silicato. Para isso, as fertirrigações foram realizadas com 3,9 L ha⁻¹ de SNaN juntamente a uma lâmina de 1,5 mm de água.

2.6 Condições climáticas

Os dados climáticos foram registrados pela estação agroclimatológica da UNESP FCAV, localizada próximo a área de condução do experimento. A variação de temperatura e umidade do ar foram registradas na Figura 1. A média da temperatura máxima do ar foi 30,41 °C, estando de acordo com a necessidade da cultura, pois segundo Almeida et al. (2008), a amplitude térmica ideal para o cultivo da cana-de-açúcar fica entre 25 e 33°C.

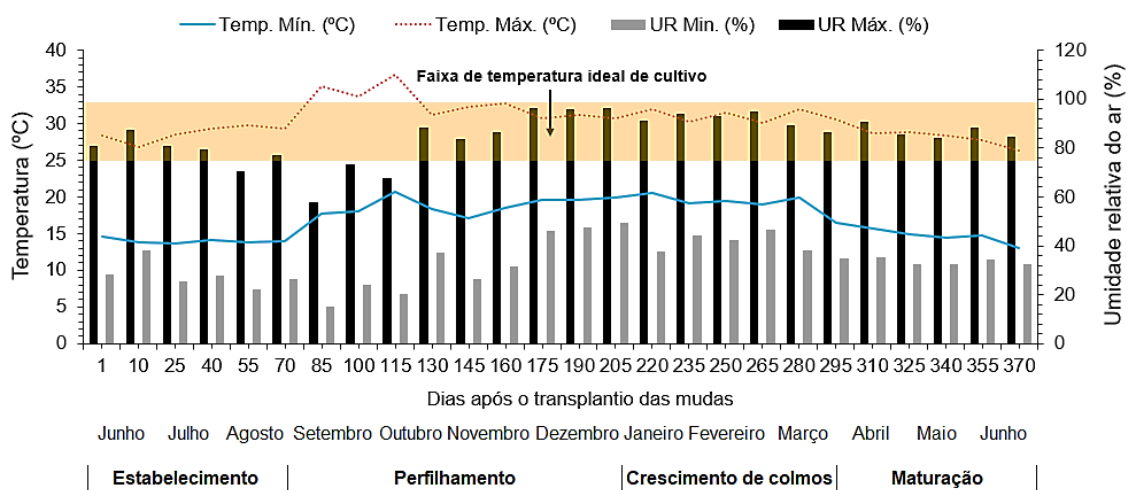


Figura 1. Temperatura mínima (Temp. Mín.) e máxima (Temp. Máx.), umidade mínima (UR Mín.) e máxima (UR Máx.) durante período experimental da cana-de-açúcar nos anos de 2020 e 2021, em Jaboticabal - SP.

2.7 Sistema de irrigação e injeção de fertilizantes

O sistema de irrigação adotado foi de gotejamento subsuperficial modelo Topdrip 15 mil, com emissores espaçados de 0,5 m, $1 \text{ L m}^{-1} \text{ h}^{-1}$ e pressão de serviço de 1,20 kPa (Apêndice 3).

Os tubos gotejadores foram enterrados a 0,30 m de profundidade sob a linha de plantio das MPB.

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) de 93,23%, foi calculado em função das vazões dos gotejadores segundo metodologia proposta por Keller e Karmeli (1975). O valor calculado é considerado excelente para o sistema de gotejamento (Bernardo et al., 2019).

A captação de água para utilização no sistema é de origem subterrânea, e passou por filtragem em discos de 125 mesh. A água captada era armazenada em um reservatório com volume útil de $17,5 \text{ m}^3$, localizado há 120 m de distância do experimento. O sistema de irrigação era acionado por uma motobomba centrífuga de 1 cv acoplada a manômetro e sistema de injeção de fertilizantes por sucção direta, onde o Si foi adicionado a irrigação por um sistema adjacente à tubulação de sucção, dessa forma a solução era succionada juntamente a água, passando pela bomba e tubulação até chegar aos emissores.

2.8 Manejo da irrigação

Durante a condução do experimento, no período de 22/06/2020 a 23/06/2021, a precipitação foi de 807,5 mm. Foram realizadas irrigações que totalizaram 447,8 mm no tratamento 10% da CRA; 542 mm no tratamento 35% da CRA e 765,7 mm aplicados para o tratamento de 70% de CRA (Figura 2). O valor máximo de evapotranspiração da cultura (ET_c) foi de $7,7 \text{ mm dia}^{-1}$ aos 162 DAT e a média de $3,7 \text{ mm dia}^{-1}$ durante o ciclo.

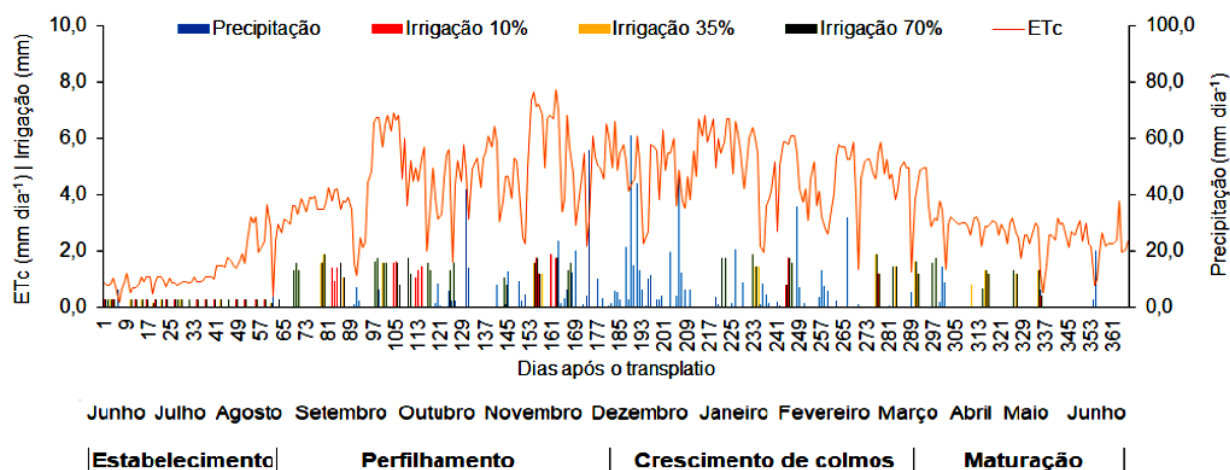


Figura 2. Valores observados de precipitação, evapotranspiração da cultura (ETc) e lâminas de irrigação aplicadas de acordo com o tratamento ao longo do período experimental.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi obtida na Estação Agroclimatológica Automatizada da UNESP-FCAV, que utiliza para o cálculo da ET_o a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

A reposição da água consumida foi determinada pela evapotranspiração de cultura (ET_c), produto da ET_o pelo coeficiente de cultivo (K_c)

O coeficiente de cultivo (K_c) foi definido de acordo com os estádios de desenvolvimento da cultura, sendo, fase de estabelecimento no campo: K_c inicial= (0,23;0,40; 0,50) no período de 0 a 60 DAT; perfilhamento= (0,60; 0,80; 1,03) de 61 a 180 DAT; crescimento de colmos = (1,03) de 181 a 280 DAT; e maturação dos colmos (1,03 - 0,75) de 281 a 335 DAT (Allen et al., 1998; Gonçalves e Miranda, 2014). A partir dos 335 DAT, a irrigação foi finalizada, para que a sacarose pudesse se concentrar nos colmos.

O manejo da irrigação foi adotado em função do déficit acumulado de 20 mm.

Ao longo do experimento, foram realizadas coletas de solo a cada 30 dias, com finalidade de determinar a umidade (h) de cada tratamento. Para isso, retiraram-se quatro amostras por tratamento, as quais foram levadas ao laboratório para pesagem da massa úmida (Mu), em seguida acondicionadas em estufa a 105 °C por 48h, e posteriormente pesadas novamente para obtenção da massa seca de solo (Ms). O cálculo seguiu a fórmula:

$$h (\%) = (Mu \div Ms) * 100$$

A partir dos dados obtidos referentes a umidade do solo em cada tratamento, foram feitos ajustes nas lâminas de irrigação para equilibrar a CRA do solo.

2.9 Avaliações realizadas

2.9.1 Análises tecnológicas

Aos 360 DAT, foram realizadas a separação de oito colmos aleatórios por bloco dentro de cada tratamento, para realização das análises tecnológicas afim de mensurar a qualidade industrial da cana-de-açúcar, sendo: sólidos solúveis totais (°Brix), teor de fibra (%), quantidade de sacarose do colmo (PC), quantidade de sacarose no caldo (POL) em %, pureza (%) e açúcares totais recuperáveis (ATR) em kg Mg⁻¹. As análises foram realizadas em laboratório de acordo com o método da CONSECANA (2006).

2.9.2 Análises biométricas

Foram realizadas três avaliações biométricas iniciais ao longo do plantio aos 122, 164 e 182 DAT, e a última no momento da colheita, aos 367 DAT, no qual avaliou-se:

A altura de plantas, realizada com auxílio de trena, sendo mensurada da base do colmo até o ápice da última folha completamente desenvolvida.

O diâmetro do colmo foi obtido a partir da média de três colmos por touceira, que foram mensurados a 30 cm do solo com auxílio de paquímetro digital.

O número de colmos por touceira foi contado manualmente, sendo estimado em quantidade por metro de cana-de-açúcar.

No momento da colheita (367 DAT), contou-se o número de entrenós por colmo, a partir da média entre três colmos por touceira. Para mensurar o rendimento, as plantas foram cortadas a 10 cm do solo, sendo colhidos 2,6 metros de plantio de cana-de-açúcar (área equivalente as 4 plantas úteis do meio do bloco) de cada unidade experimental, e pesados em balança digital, para estimar a produtividade em t ha⁻¹.

2.9.3 Análise de silício

Para análise de Si no colmo e nas folhas, foram selecionados três colmos por touceira, sendo destes também retiradas e separadas as últimas folhas completamente expandidas.

Os colmos frescos foram triturados e homogeneizados para retirada de 500 g de amostra. As folhas e os colmos frescos moídos foram levados a estufa para serem secos a temperatura de $65^{\circ}\text{C} \pm 5$, até atingirem massa constante. Após secos, os colmos e as folhas foram moídos em moinho tipo Wiley.

Para determinar o teor de Si, foram utilizadas 0,1 mg de amostras secas e moídas. As amostras foram adicionadas a tubos de polietileno, seguido pela adição de 2,0 mL de H_2O_2 (30% v / v) e 3,0 mL de NaOH (25 mol L^{-1}), em seguida, as amostras foram extraídas seguindo a metodologia de Kraska e Breitenbeck (2010). Realizou-se a leitura do extrato obtido com auxílio do espectrofotômetro a 410 nm para obtenção do conteúdo de Si, seguindo a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004).

2.9.4 Análise estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância aplicando o teste F, e quando significativos para as variáveis qualitativas, ao teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparação das médias, utilizando o software estatístico SAS 9.2.

3 Resultados

3.1 Altura

Para as análises de altura realizadas ao longo do crescimento de colmos, observou-se que não houve efeito do Si na diferenciação da altura verificada na primeira avaliação aos 122 DAT (Figura 3a), diferentemente da CRA do solo, que proporcionou maior altura em 70%, seguido por 35% e 10% da CRA (Figura 3a). Aos 164, 182 e aos 367 DAT, foi verificado respectivamente um aumento de 3,84%, 3,84% e 8,70% na altura de plantas de cana-de-açúcar que receberam fornecimento de Si no tratamento cultivados em 35% da CRA do solo (Figuras 3b, c, d). A variação nas CRA influenciou a altura de plantas aos 164, 182 e 367 DAT, que foi maior no tratamento 70%,

seguido por 35% e 10% (Figuras 3b, c, d). Aos 182 DAT, a menor altura foi observada na CRA de 10% de plantas tratadas com Si (Figuras 3c), porém aos 367 DAT, a altura de plantas em 35% da CRA tratadas com Si se equiparou ao tratamento controle de 70% da CRA (Figuras 3d).

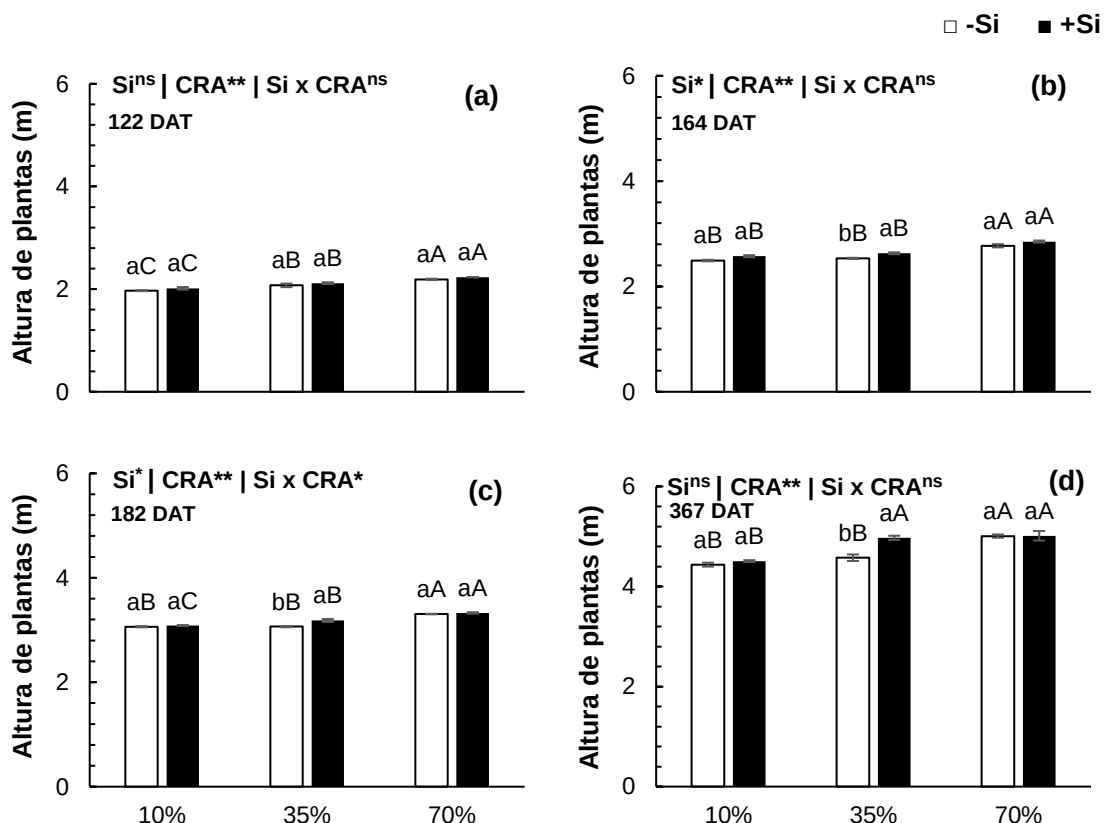


Figura 3. Altura de plantas de cana-de-açúcar aos 122 DAT (a), 164 DAT (b), 182 DAT (c) e aos 367 DAT (d) cultivadas na ausência (-Si) e presença (+Si) de silício fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 10%, 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, CRA: capacidade de retenção de água no solo, CRA x Si: interação.

3.2 Número de colmos

Aos 122 e 164 DAT, não foi observada diferença significativa no número de colmos no tratamento 10% da CRA, porém o Si incrementou essa variável em 17,14% (122 DAT) e 20,51% (164 DAT) nos tratamentos 35% da CRA, e em 26,98% (122 DAT) e 15,01% (164 DAT) no tratamento 70% da CRA

comparado as plantas ausentes no elemento (Figuras 4a, b). Aos 182, os tratamentos 10, 35 e 70% da CRA respectivamente apresentaram 26,86%, 22,3% e 26,22% maior número de colmos quando tratados com Si (Figuras 4c), por outro lado, aos 367 DAT, apenas as plantas com 10% da CRA apresentaram 14,87% maior número de colmos ao receberem o elemento benéfico (Figuras 4d).

As diferentes CRA do solo também influenciaram o número de colmos, onde em todas as avaliações, o maior resultado foi observado em plantas cultivadas em 70%, seguida por 35% da CRA (122, 164, e 367 DAT) (Figuras 4a, b, d), com exceção do tratamento 35% aos 182 DAT, que não diferiu do tratamento controle (Figuras 4c). O menor número de colmos foi observado no tratamento de 10% da CRA, exceto as plantas ausentes em Si avaliadas aos 122 DAT, que não diferiram do tratamento controle (Figuras 4a, b, c, d).

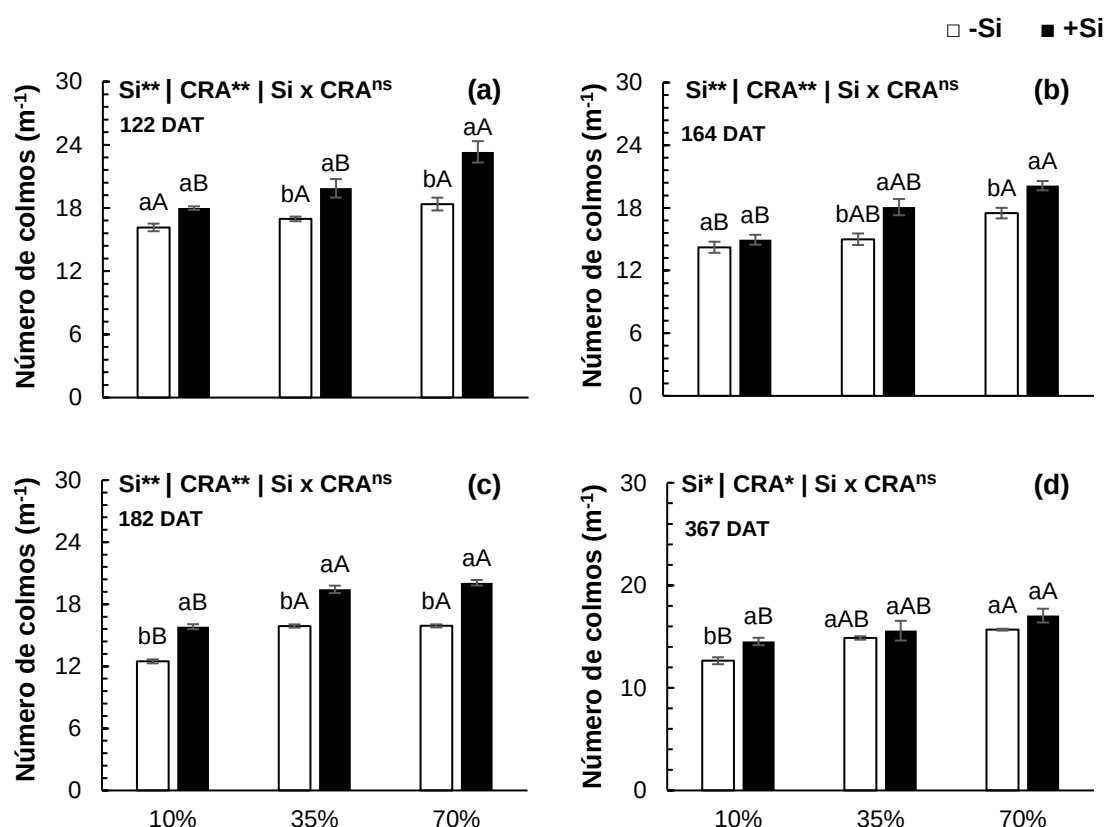


Figura 4. Número de colmos de plantas de cana-de-açúcar aos 122 DAT (a), 164 DAT (b), 182 DAT (c) e aos 367 DAT (d) cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas

mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 10%, 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, CRA: capacidade de retenção de água no solo, CRA x Si: interação.

3.3 Diâmetro

As plantas tratadas com Si dentro do tratamento 10% da CRA não diferiram de plantas ausentes em Si aos 122 e 164 DAT (Figuras 5a, b), por outro lado, nessa CRA o tratamento com Si aumentou em 17,24% (182 DAT) e em 8,68% (367 DAT) o crescimento das plantas comparado as ausentes em Si (Figuras 5c, d). As plantas tratadas em 35% da CRA apresentaram 13,15%, 7,97%, 6,62% e 5,21% maior diâmetro quando tratadas com Si em 122, 164, 182 e 367 DAT respectivamente (Figuras 5a, b, c, d). Para as plantas cultivadas em 70% da CRA, o fornecimento de Si aumentou em 11,35% (122 DAT) e em 5,24% (182 DAT) o diâmetro das plantas (Figuras 5a, c).

As diferentes CRA do solo influenciaram o diâmetro de colmos, sendo o maior valor observado em 70% e em 35% da CRA, porém esse último com exceção das plantas ausentes em Si avaliadas em 122 e 164 DAT (Figuras 5a, b, c). Já os menores valores foram verificados em 10% da CRA, exceto na avaliação realizada aos 164 DAT, no qual as plantas tratadas com Si não diferiram estatisticamente das demais CRA (Figura 5b).

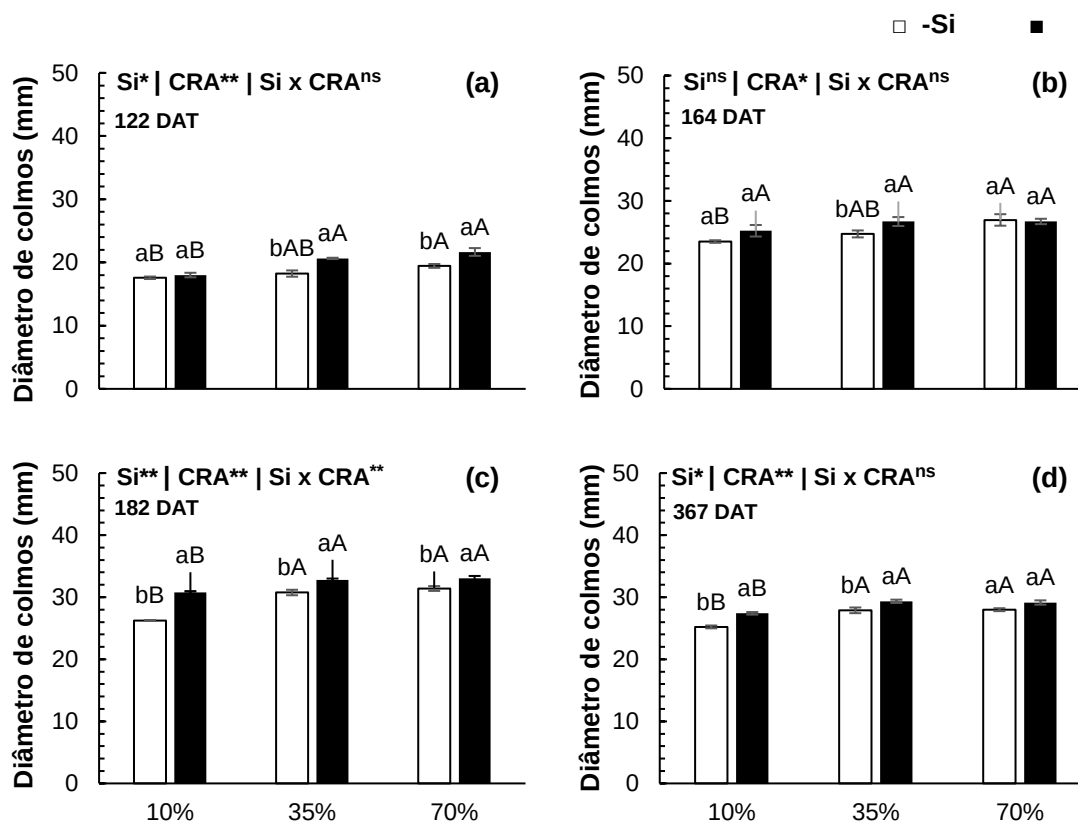


Figura 5. Diâmetro de colmos de plantas de cana-de-açúcar aos 122 DAT (a), 164 DAT (b), 182 DAT (c) e aos 367 DAT (d) cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 10%, 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, CRA: capacidade de retenção de água no solo, CRA x Si: interação.

3.4 Número de entrenós

Na avaliação realizada ao final do experimento (367 DAT), verificou-se que a fertirrigação com Si diferiu no número de colmos apenas no tratamento 35% da CRA, que aumentou em 8,66% comparado a plantas ausentes no elemento (Figura 6). A CRA do solo influenciou o crescimento das plantas, sendo o tratamento 70% da CRA que proporcionou o maior número de entrenós, o 35% da CRA tratado com Si, intermediário, e o 35% da CRA ausente em Si e as plantas em 10% da CRA o que tiveram o menor desenvolvimento (Figura 6).

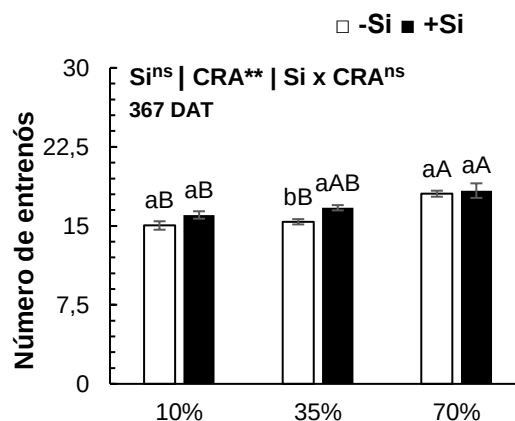


Figura 6. Número de entrenós de plantas de cana-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 10%, 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, CRA: capacidade de retenção de água no solo, CRA x Si: interação.

3.5 Produtividade

A fertirrigação silicatada aumentou em 15,43% a produtividade de colmos por hectare em plantas tratadas em 10% da CRA e em 13,74% os tratamentos 35% da CRA, não havendo diferença entre os tratamentos em plantas controle (Figura 7). Com relação a regime hídrico, a maior produtividade foi observada nas plantas cultivadas no tratamento de 70% da CRA tanto na presença quanto na ausência de Si, bem como em plantas sob 35% da CRA que foram fertirrigadas com Si. A produtividade intermediária foi observada em plantas 35% da CRA ausentes em Si e em plantas sob 10% da CRA tratadas com Si, e a menor produtividade foi observada em plantas sob 10% da CRA que não foram tratadas com Si (Figura 7). As produtividades observadas para as plantas dos tratamentos 10%, 35% e 70% da CRA respectivamente foram de 131,56; 162,94 e 188,98 t ha⁻¹ em plantas ausentes em Si (- Si) e de 151,87; 185,34 e 202,73 t ha⁻¹ em plantas tratadas com Si (+Si).

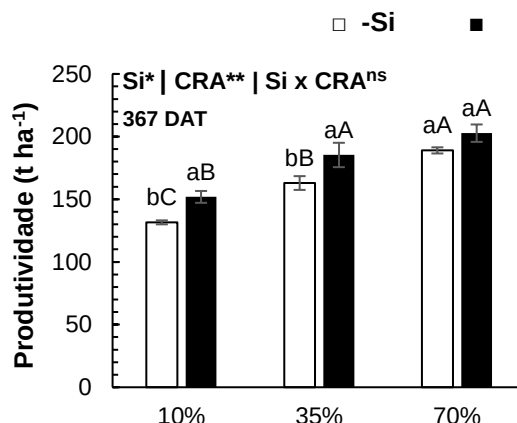


Figura 7. Produtividade de plantas de cana-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 10%, 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, CRA: capacidade de retenção de água no solo, CRA x Si: interação.

3.6 Silício

O fornecimento de Si via fertirrigação comparado o tratamento ausente, aumentou o teor do elemento nas folhas em 29,67%, 26,51% e 35,65% e no colmo em 80,54%, 31,95% e 48,54%, respectivamente para as plantas em 10%, 35% e 70% da CRA do solo (Figura 8). As diferentes CRA do solo não influenciaram o teor de Si nas folhas, entretanto, no colmo das plantas ausentes em Si, os tratamentos 35% e 70% apresentaram maior teor do elemento em detrimento do 10% da CRA (Figuras 8).

O teor de Si em cana-de-açúcar também variou com o órgão da planta, sendo verificado maiores quantidades do elemento em folhas e menores no colmo (Figura 8).

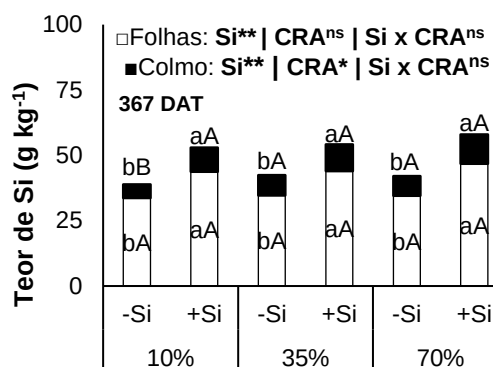


Figura 8. Teor de silício em folhas e colmos de plantas de cana-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 10%, 35% e 70% da CRA na mesma condição de Si. Si: silício, CRA: capacidade de retenção de água no solo, CRA x Si: interação.

3.7 Qualidade

O teor de sólidos solúveis (Brix) apresentou maior quantidade em plantas ausentes em Si, sendo os tratamentos 35% e 70% da CRA (-Si) maiores em 2,83% e 2,12% respectivamente que as plantas tratadas com Si. O Brix decresceu com o aumento da CRA, sendo as maiores quantidades observadas em plantas sob 10%, e em plantas ausentes em Si sob 35% e 70% da CRA (Figura 9a).

Assim como no Brix, as variáveis Pol da cana-de-açúcar (Figuras 9c) e Pol do caldo (Figuras 9d) apresentaram 2,77% e 2,17% (PC%) e 4,04% e 2,85% (POL%) melhor desempenho em plantas ausentes em Si (-Si) comparado as tratadas com elemento benéfico, respectivamente para os tratamentos 35% e 70% da CRA. Não foi observada diferença entre os tratamentos em 10% da CRA. As diferentes CRA do solo não influenciaram a PC (%) e POL (%).

Não foi observada diferença estatística entre os tratamentos nas variáveis Pureza (Figuras 9e) e Fibra (Figuras 9b) de cana-de-açúcar.

A ATR não foi influenciada pela fertirrigação silicatada, porém foi observada diferença entre as CRA do solo. A maior ATR em plantas ausentes

em Si (-Si) foi obtida em 10% da CRA (181,19 kg t⁻¹), seguido por 35% (179,22 kg t⁻¹) e por último 70% (174,27 kg t⁻¹) da CRA. Plantas tratadas com Si não diferiram quanto a CRA do solo (Figura 9f).

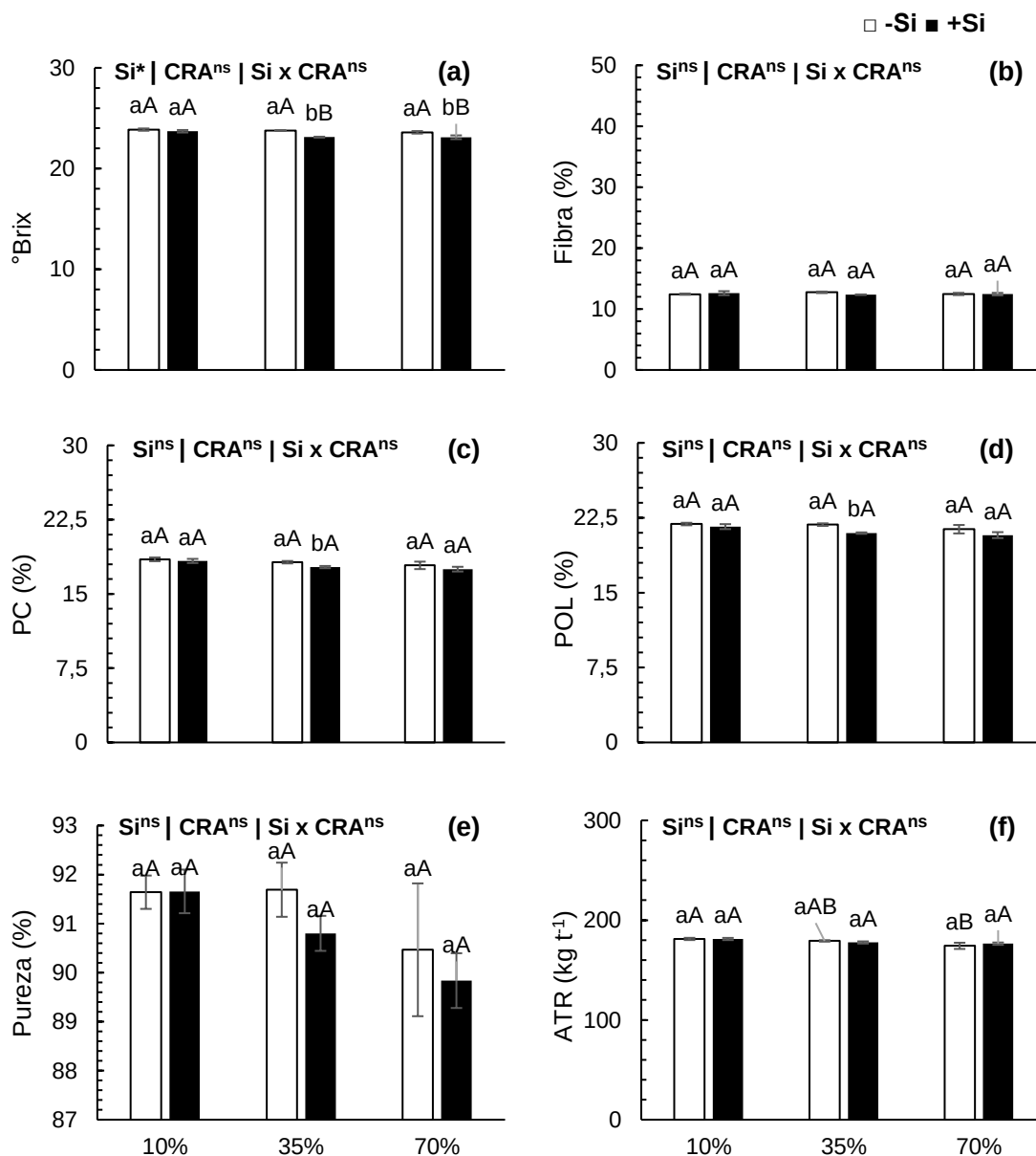


Figura 9. Brix (a), fibra (b), Pol da cana (PC) (c), Pol do caldo (POL), pureza (e) e açúcar total recuperável (ATR) (f) de plantas cana-de-açúcar cultivadas na ausência (-Si) e presença de silício (+Si) fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. ** e *: significativo com 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, e ns: não significativo pelo teste F. Letras minúsculas mostram diferenças entre -Si e +Si dentro da mesma CRA, e letras maiúsculas mostram diferenças entre 10%, 35% e 70% da CRA na mesma

condição de Si. Si: silício, CRA: capacidade de retenção de água no solo, CRA x Si: interação.

4 Discussão

Independente da CRA nos quais os tratamentos foram submetidos, a fertirrigação silicatada proporcionou um aumento da concentração de Si no solo de cultivo, o que levou a absorção pelas plantas, resultando assim no maior teor em folhas seguido pelos colmos da cana-de-açúcar (Figura 8).

O fornecimento de Si via fertirrigação nesse experimento foi indispensável devido ao baixo teor do elemento encontrado no momento da implantação do canavial, que foi de 9 kg^{-1} de Si na camada de 20 - 40 e de 11 mg kg^{-1} de Si em 0 - 20 (Tabela 1), sendo considerado crítico segundo Berthelsen et al. (2002), que cita que os solos abaixo da faixa de 10 a 20 mg kg^{-1} de Si (em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$) são limitantes em Si para o plantio de cana-de-açúcar.

O efeito do Si foi observado nas avaliações realizadas ao longo do desenvolvimento da cana-de-açúcar, promovendo incrementos na altura (Figura 3), número de colmos (Figura 4) e diâmetro dos colmos (Figura 5), que são considerados atributos importantes para determinar o potencial de rendimento da cana-de-açúcar (Silva et al., 2008; Vitti et al., 2010), e que consequentemente influenciaram a produtividade.

Nas diferentes avaliações realizadas ao longo do cultivo, observou-se que as diferentes CRA do solo também influenciaram as variáveis de desenvolvimento da cana-de-açúcar. As plantas cultivadas sob déficit de 10% e 35% da CRA comparadas ao tratamento controle (70% da CRA), apresentaram a altura de plantas (Figura 3), o número de colmos (Figura 4) e o diâmetro de colmos (Figura 5) reduzidos, especialmente quando na ausência de aplicação de Si no solo.

A restrição hídrica imposta nos tratamentos de 10% e 35% da CRA levaram a redução da altura de plantas em todas as avaliações realizadas ao longo do ciclo de cultivo. Ao avaliarem o déficit hídrico por suspensão de rega imposto em diferentes fases de cultivo da cana-de-açúcar, Machado et al. (2009), também verificaram uma redução de altura em nas fases de crescimento inicial, crescimento máximo e de acúmulo de sacarose no colmo.

O número de colmos (Figura 4), o diâmetro de colmos (Figura 5) e o número de entrenós do colmo (Figura 6), também foram reduzidos com a imposição do déficit hídrico, especialmente nos tratamentos de 10% da CRA seguido pelo 35% da CRA. Essas variáveis são importantes para mensuração da produtividade, devido ao colmo ser a parte da cana-de-açúcar do qual se é extraído o açúcar e etanol pelo processamento do suco extraído (Machado et al., 2009; Camargo et al., 2017).

Apesar da imposição da restrição hídrica, o fornecimento de Si via fertirrigação evitou a redução da altura (Figura 3), número de colmos (Figura 4) e diâmetro de colmos (Figura 5) ao longo do cultivo. Em todas as situações, o Si ou proporcionou melhores resultados, ou não diferiu dos tratamentos ausentes em Si, porém nunca apresentando resultados inferiores a esses.

Para as avaliações de qualidade de cana-de-açúcar, o aumento progressivo das lâminas de irrigação verificado na maior CRA do solo reduziu as variáveis como sólidos solúveis (Brix) (Figura 9a) e ATR (Figura 9f). Somado a isso, o fornecimento do Si também levou a redução do Brix (Figura 9a), PC% (Figura 9c) e POL% (Figura 9d). Não foi observada diferença entre os tratamentos para a fibra (Figura 9b) e pureza (Figura 9e).

Assim como nessa pesquisa, Costa et al. (2019), ao estudarem a produtividade e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, observaram que o aumento da lâmina de irrigação também levou a uma redução no Brix do caldo da cana-de-açúcar. Porém, ainda os mesmos autores não observaram o efeito das diferentes lâminas para ATR, POL da cana e do POL do caldo.

Em estudos relacionando a frequência de irrigação por gotejamento subsuperficial no desenvolvimento da cana-de-açúcar, Dalri et al. (2008) também não observaram a influência de lâminas de água aplicadas para as variáveis fibra e pureza de caldo.

O aumento da CRA do solo pode levar a redução de alguns parâmetros de qualidade, a exemplo do teor de sólidos solúveis (Brix). Esse efeito é devido a maior disponibilidade de água no solo aumentar a absorção de água pela planta e consequentemente levar a uma diluição da concentração de açúcares no colmo (Costa et al., 2019). Autores como Oliveira et al. (2011), ao estudarem os efeitos de variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob regime

hídrico de sequeiro e irrigação plena, também verificaram uma redução nos teores de sólidos solúveis da cana-de-açúcar irrigada em detrimento do sequeiro.

Em estudos realizados por Camargo et al. (2017), avaliando o efeito do Si na recuperação de cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao déficit hídrico, os autores não observaram diferenças nos parâmetros da qualidade tecnológica do caldo de cana-de-açúcar referente as variáveis brix, pureza do caldo e fibra.

A redução dos sólidos solúveis (Brix), PC% e POL% devido ao fornecimento de Si também pode ser explicada pela lógica da diluição da concentração dos açúcares presentes no colmo, possivelmente ocasionado pela melhora no status hídrico das plantas. Isso se justifica pelo Si ser um elemento estimulante da absorção de água, que aperfeiçoa o transporte hídrico pela raiz através de um aumento na atividade das aquaporinas, proteínas responsáveis pelo transporte hídrico em plantas, e que podem ter a expressão de seus genes (PIPs) estimulada pelo Si (Chen, et al., 2016).

É comum que plantas tratadas com Si apresentem uma melhora no status hídrico, assim como observada em mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar por Teixeira et al. (2020), que ao estudarem se o Si via pulverização foliar ou via solução nutritiva era capaz de aliviar os estresses por déficit hídrico, concluíram uma melhora no potencial hídrico foliar assim como no conteúdo de água na folha.

Apesar da restrição hídrica levar a redução na produção de biomassa de 30,38% (10% da CRA) e 13,77% (35% da CRA) comparado as plantas controle, o fornecimento de Si possibilitou a manutenção da produtividade de cana-de-açúcar cultivadas em diferentes CRA do solo (Figura 7). Esse resultado se justifica pela maior produção de colmos, verificado no aumento no diâmetro dos colmos (Figura 5), resultante do maior status e concentração hídrica. Isso ocorre pelo Si desempenhar uma melhora no ajuste osmótico, que reduz a perda de água por evapotranspiração e aumenta a produção de biomassa, como observado em outras monocotiledôneas como na cultura do milho verificado por Sarah et al. (2021) ou na cultura do sorgo por Chen et al. (2016).

Por melhorar a resistência física e desempenho fisiológico, o tratamento com Si em plantas comparado a ausência no elemento, possibilitou um aumento de 15,43% e 13,74% para os tratamentos 10% e 35% da CRA na biomassa de cana-de-açúcar cultivadas sob déficit hídrico. Esse resultado foi corroborado por autores como Teixeira et al. (2021a), que observaram maior massa da parte aérea, raiz e massa total de cana-de-açúcar tratada com Si via silício via foliar e radicular na mitigação dos danos ocasionados por déficit hídrico. Em outro estudo, Teixeira et al. (2021b), avaliando o Si aplicado via fertirrigação na fase de produção mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar *Saccharum officinarum* L. e *S. spontaneum* L., verificaram que o elemento foi eficiente para mitigar os efeitos causados pela restrição hídrica em ambas as espécies, devido uma melhora no sistema de defesa antioxidante com aumento da atividade da atividade enzimática, e de osmólitos reguladores, que proporcionaram estabilidade no status hídrico celular, aumento do crescimento das plantas.

Autores como Camargo et al. (2020), avaliando o efeito da fertilização com doses crescentes de silício em cultivares de cana-de-açúcar tolerantes e não tolerantes à seca, observaram que o elemento aumenta o Si no solo, a absorção de Si e o desenvolvimento da biomassa da parte aérea. Ainda estudando cana-de-açúcar, Camargo et al. (2019) também verificaram que o Si atuou benéficamente ao combate dos efeitos do déficit hídrico durante duas safras de cultivares tolerantes e não tolerantes à seca. Os autores observaram aumentos no conteúdo relativo de água, no potencial hídrico e na massa seca.

5 Conclusão

O fornecimento de $1,8 \text{ mmol L}^{-1}$ de Si via fertirrigação em de cana-de-açúcar cultivada sob sistema de gotejo subsuperficial é viável agronomicamente.

O Si reduziu os estresses por déficit hídrico em cana-de-açúcar nos tratamentos de semi-sequeiro (10% da CRA) e 35% da CRA do solo, aumentando respectivamente em 15,43%, 13,74% a produtividade comparada as plantas ausentes no elemento.

6 Referências

Almeida ACDS, Souza JL, Teodoro I, Barbosa GVS, Moura Filho G, Ferreira Júnior RA (2008) Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia** 32: 1441-1448. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500013>

Avilez AMA, Hernandez FBT, de Carvalho Bispo R, Giovanelli LB (2018) Necessidade hídrica da cana-de-açúcar no Noroeste Paulista. **Irriga** 1:171-188. <https://doi.org/10.15809/irriga.2018v1n1p171-188>

Bernardo S, Mantovani EC, Silva DD, Soares AA (2019) **Manual de irrigação**. 9. Ed. Viçosa: UFV. 545 p.

Zhao D, Li YR (2015) Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy** 2015:1–10. <https://doi.org/10.1155/2015/547386>

Martins APC, Albrecht LP, Castaldo J, Carneiro R, Zucareli V (2015) Novas tecnologias no plantio de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). **Journal of Agronomic Sciences** 4:301–317.

Rodolfo Junior F, Ribeiro Junior WQ, Ramos MLG, Rocha OC, Batista LMT, Da Silva FAM (2016) Produtividade e qualidade de variedades de cana-de-açúcar de terceira soca sob regime hídrico variável. Embrapa Cerrados-Artigo em periódico indexado (ALICE).

Oliveira SL, Coelho EF, Borges AL (2007) **Irrigação e fertirrigação**. Frutas do Brasil - Banana Produção, 1.

Epstein E (1999) Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology** 50:641–664

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. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162017005000008>.

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. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-0012-1>

Camargo MS, Bozza NG, Pereira HS, Silva VM, Silva MA (2020) Increase in Silicate Fertilization Improves the Biomass of Drought-Tolerant Contrasting Cultivars Without Prejudicial effects in Nutrient Uptake in Sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20:2329-2337. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00300-3>

Chen D, Wang S, Yin L, Deng X (2018) How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency?. **Frontiers in plant science** 9:281. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281>

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific reports** 6:1-14. <https://doi.org/10.1038/srep22882>

Coelho AP, Dalri AB, de Andrade Landell EP, de Faria RT, Palaretti LF (2018) Produtividade inicial e eficiência no uso da água de cultivares de cana-de-açúcar fertirrigadas e plantadas por mudas pré-brotadas. **Scientia Agraria** 19:57-64. <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v19i2.50689>

Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo (CONSECANA) 2006. Instructions Manual. CONSECANA, Piracicaba.

Costa ARFC, Rolim MM, Neto DES, Silva MM, Silva GF, Pedrosa EMR (2019) Produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar submetida a diferentes lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. **Irriga** 24:38-53. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p38-53>

Dalri AB, Cruz RL, Garcia CJB, Duenhas LH (2008) Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade da cana-de-açúcar. **Irriga** 13:1-11. <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n1p1-11>

Donagema GK, de Campos DB, Calderano SB, Teixeira WG, Viana JM (2011). **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa Solos-Documents (INFOTECA-E).

Gonçalves FM, Miranda FR (2014) **Coeficientes de cultivo da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial**. Embrapa Agroindústria Tropical-Documents (INFOTECA-E).

Jadoski CJ, Toppa BEV, Julianetti A, Hulsbof T, Ono EO, Rodrigues JD (2010) Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Pesquisa aplicada e Agrotecnologia** 3:169-186. <https://doi.org/10.5777/paet.v3i2.1064>

Keller J, Karmeli D (1975) Trickle irrigation design. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 133 p.

Köppen W (1948) **Climatologia**: com um estúdio de los climas de la tierra. México: Fondo de Cultura Economica, 478 p.

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (Eds) (2004) Análise de silício no solo, planta e fertilizantes. Uberlândia: UFU, 50p.

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075–2085. <https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537>

Ma JF (2004) Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition** 50:11-18. <https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408447>

Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science** 11: 392-397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>

Machado RS, Ribeiro RV, Marchiori PER, Machado DFSP, Machado EC, Landell MGA (2009) Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:1575-1582. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009001200003>

Nocelli RCF, Zambon V, Guilherme O, da Silva M, de Castro Morini MS (2017) Histórico da cana-de-açúcar no Brasil: contribuições e importância econômica. **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica** 13.

Oliveira ECAD, Freire FJ, Oliveira ACD, Simões Neto DE, Rocha ATD, Carvalho LAD (2011) Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 46:617-625.

Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (Eds.) (1997) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC.

Raij B, Andrade J, Cantarella H, Quaggio J (Eds.) (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 285p.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbrreras JF, Coelho MR, Almeida JÁ, Araújo Filho JC, Oliveira JB, Cunha TJ (2018) **Brazilian soil classification system**, 2a. Brasília: Embrapa Soils.

Sarah MMS, de Mello Prado R, de Souza Júnior JP, Teixeira GCM, dos Santos Duarte JC, de Medeiros RLS (2021) Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. **ScientificReports** 11:1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99194-z>

Silva MA, Soares RAB, Landell MGA, Campana MP (2008) Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia** 67: 656-661. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000300014>

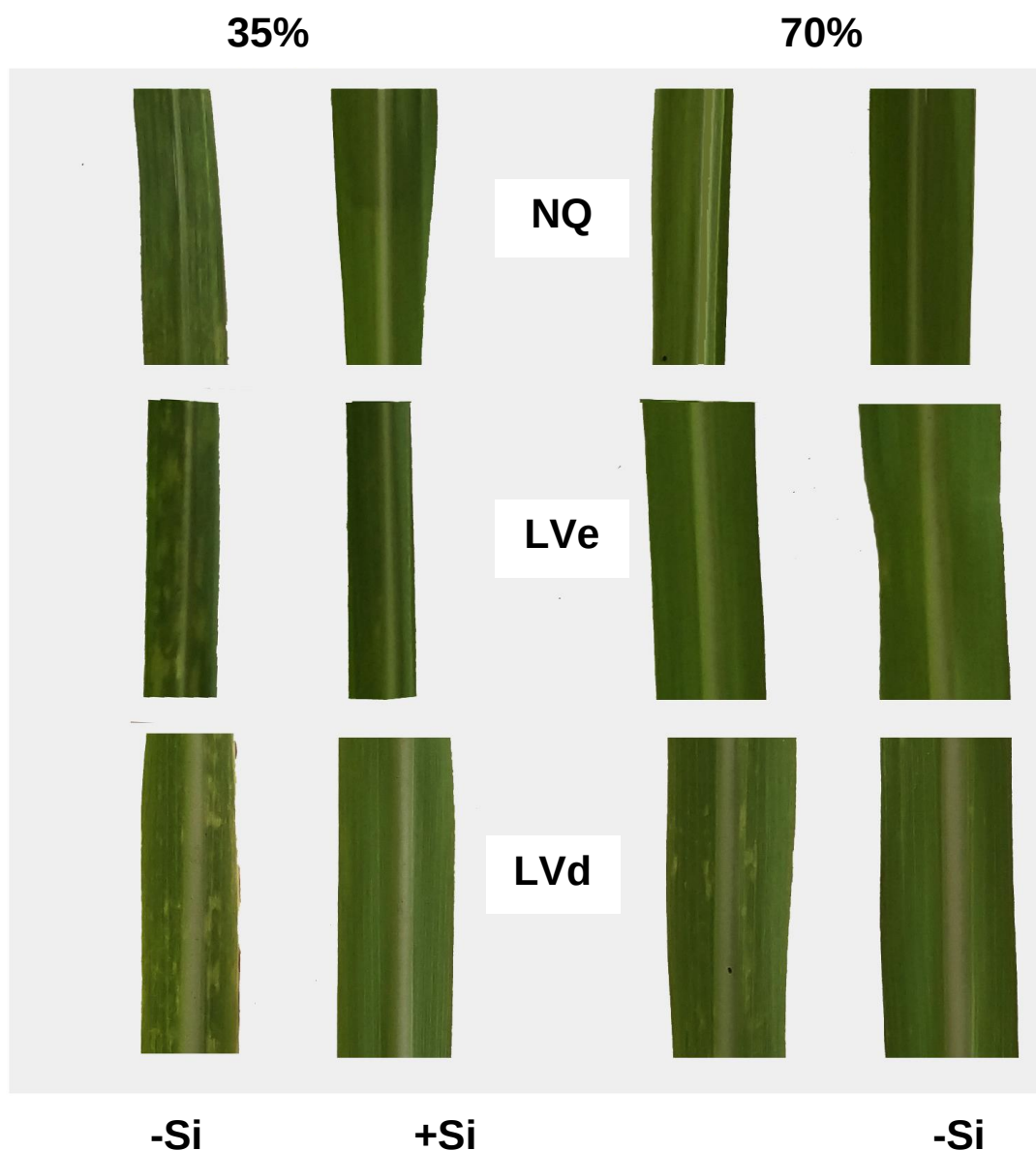
Teixeira GCM, de Mello Prado R, Rocha AMS (2021a) Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science** 0: 1– 10. <https://doi.org/10.1111/jac.12511>

Teixeira GCM, Mello Prado RD, Rocha AMS, Silveira Sousa Junior GD, Gratão PL (2021b). Beneficial Effect of Silicon Applied Through Fertigation Attenuates Damage Caused by Water Deficit in Sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation** 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10510-3>

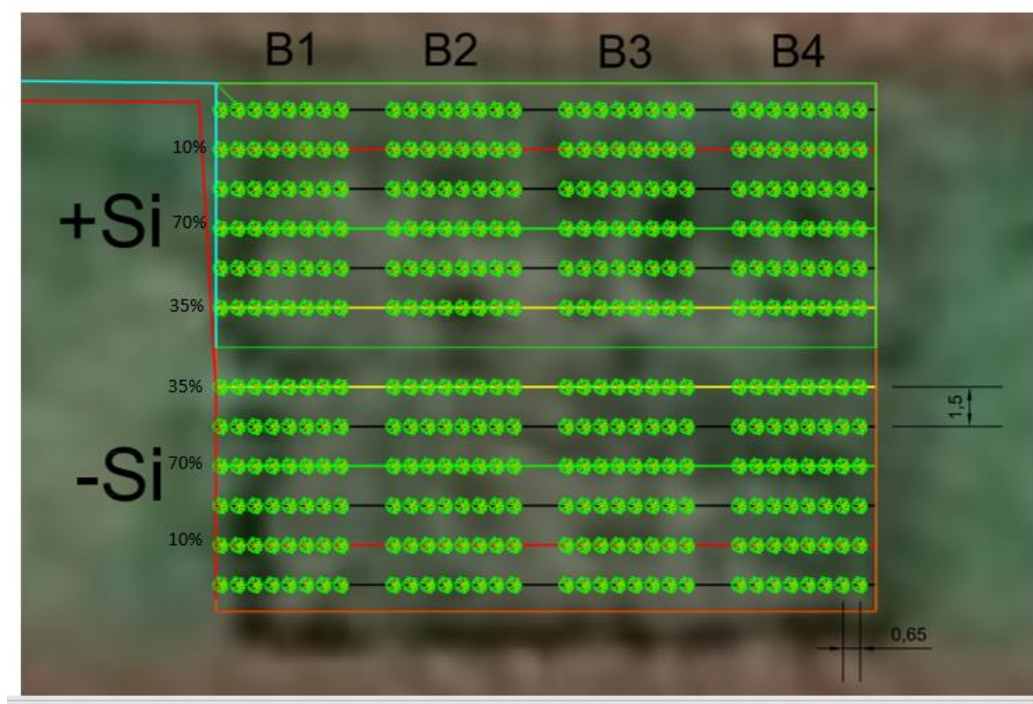
Teixeira GCM, de Mello Prado R, Rocha AMS, dos Santos LCN, dos Santos Sarah MM, Gratão PL, Fernandes C (2020) Silicon in pre-sprouted sugarcane seedlings mitigates the effects of water deficit after transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 20: 849-859. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00170-4>

Vitti AC, Cantarella H, Trivelin PCO, Rossetto R, Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM, Landell MGA (2010) **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas1:239-270.

APÊNDICE



Apêndice 1. Sintomas da deficiência de silício verificado no terço médio de folhas +1 de canas-de-açúcar cultivadas na fase de soqueira em Neossolo Quartzarênico (NQ) (A); Latossolo Vermelho eutroférico (LVe) (B); e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (C), na ausência (-Si) e presença (+Si) de Si fornecido via fertirrigação sob regime hídrico de 70% e 35% da CRA do solo.



Apêndice 2. Esquema experimental do plantio de cana-de-açúcar realizado em campo na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da Unesp/FCAV em Jaboticabal - SP. Ausência (-Si) e presença (+Si) de Si fornecido via fertirrigação sob o regime hídrico de 10%, 35% e 70% da CRA do solo. Espaçamento entre plantas de 0,65 m, e entre linhas de 1,5 m.



Apêndice 3. Visão frontal do experimento com de cana-de-açúcar na fase de estabelecimento das MPB. Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão (FEPE) da Unesp/FCAV em Jaboticabal - SP.