

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

**RELAÇÃO BORO E SILÍCIO EM PLANTAS DE ALGODÃO
CULTIVADAS SOB DEFICIÊNCIA DE BORO**

Jonas Pereira de Souza Júnior

Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2021

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

**RELAÇÃO BORO E SILÍCIO EM PLANTAS DE ALGODÃO
CULTIVADAS SOB DEFICIÊNCIA DE BORO**

Discente: Jonas Pereira de Souza Júnior

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

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)

S729r

Souza Júnior, Jonas Pereira de

Relação boro e silício em plantas de algodão cultivadas sob
deficiência de boro / Jonas Pereira de Souza Júnior. --
Jaboticabal, 2021

93 f.

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

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientador: Cid Naudi Silva Campos

1. Desordem nutricional. 2. Micronutrientes. 3. Elemento
benéfico. 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).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA TESE: RELAÇÃO BORO E SILÍCIO EM PLANTAS DE ALGODÃO CULTIVADAS SOB DEFICIÊNCIA DE BORO

AUTOR: JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR

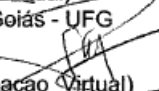
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADOR: CID NAUDI SILVA CAMPOS


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


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


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


Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Profa. Dra. SIMONE DE PÁDUA TEIXEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Farmacêuticas / FCFRP/USP - Ribeirão Preto/SP


Prof. Dr. ARTHUR BERNARDES CECILIO FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Produção Vegetal) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 21 de junho de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Jonas Pereira de Souza Júnior, nascido em Bebedouro – SP, Brasil, em 03 de julho de 1991, filho de Ilda Raimunda e Jonas Pereira de Souza. Possui curso técnico em produção agropecuária com ênfase em plasticultura (2009) pela Escola Técnica Estadual “Prof. Matheus Leite de Abreu”, Mirassol – SP. Iniciou em 2010 o curso de graduação em Engenharia Agrônoma pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) Câmpus de Jaboticabal concluindo em 2016. No primeiro ano da graduação ingressou no Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP (Genplant), realizando pesquisas relacionadas à ciclagem de nutrientes, adubação com micronutrientes e adubação potássica da cana-de-açúcar em sistemas de colheita mecanizada. Neste mesmo ano foi bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, no período de 2010 a 2012, na modalidade ITI – A – Iniciação Tecnológica e Industrial para o desenvolvimento do projeto de pesquisa “Uso eficiente da adubação em cana-de-açúcar para produção de etanol: potássio”. Em 2012, foi representante discente do Conselho do Departamento de Solos e Adubos FCAV/UNESP. Em 2013, foi bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, no programa “Inglês sem Fronteiras”, realizando missão de estudo da língua inglesa na Universidade La Trobe – Vitória - Austrália durante seis meses e no ano seguinte foi bolsista da CAPES programa “Ciência sem Fronteira”, em graduação sandwiche Brasil – na Austrália, na mesma Universidade. Em 2016 Ingressou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal. Realizou período de intercambio nacional em missão de pesquisa na UFMS Câmpus de Chapadão do Sul a partir do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD) da CAPES. Concluiu o curso de Mestrado no ano de 2018 com a apresentação da dissertação “Silício como mitigador de deficiência e toxicidade de boro na cultura do algodão cultivada em solução nutritiva”. Atualmente é ingressante no curso de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal e integrante do Genplant, atuando em pesquisas na área de nutrição de plantas, trabalhando com o uso do silício como mitigador de desordem nutricional e tendo publicado 27 artigos em periódicos científicos indexados na Web of Science (Thomson Reuters) e 4 capítulos de livros.

“Nós “tá” aqui por cada bicha com a vida interrompida, por causa de homofobia, ódio e intolerância. Resistimos no dia a dia para poder chegar o dia que prevaleça respeito, igualdade e esperança”.

Murillo Zyess (Quebrada Queer)

Aos meus pais Jonas Pereira de Souza (*in memoriam*) e Ilda Raimunda; e a minha irmã Yara Luana Pereira de Souza, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e por nunca desistirem de mim.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, ao universo, a energias positivas, ao acaso ou a qualquer definição de um agente que atua para manter as coisas fluindo em constante harmonia sendo frequentemente incompreendido, mas que me possibilitou atingir este objetivo.

Ao meu pai, Jonas Pereira de Souza (*in memoriam*), por sempre ter incentivado meus sonhos, por maiores que pudessem parecer, e me incentivar a não desistir, mesmo quando as coisas não fluem da maneira esperada.

A minha mãe, Ilda Raimunda, por toda dedicação, por compartilhar os momentos de preocupação e dividi-las deixando-as mais leve e por sempre ser meu porto seguro, para onde sempre posso retornar para recuperar as energias e então seguir adiante.

A minha irmã, Yara Luana Pereira de Souza, por todo companheirismo e apoio, pelos conselhos e por me incentivar e compartilhar todas as alegrias e conquistas deixando a jornada da vida mais feliz.

Ao meu namorado Leonardo Henrique da Silva por toda cumplicidade e por estar comigo disponível para todas as minhas ideias e aventuras. Por me ensinar com amor o verdadeiro significado de companheirismo e por compartilhar todos os momentos comigo neste final de ciclo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado que me aceitou para estágio em março do meu primeiro ano de graduação (2010) e que me ofereceu muitas oportunidades para crescimento e desenvolvimento da minha carreira na área acadêmica.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos por todo apoio para a execução deste estudo e por todas as oportunidades de parcerias em projetos que temos desenvolvido.

A minha psicóloga Cláudia Regina Ramos Nogueira por todo apoio e por me auxiliar, em todos esses anos, a manter minha saúde mental com muita paciência, dedicação e carinho e sempre me ajudar a perceber quais são os melhores caminhos.

Aos meus melhores amigos Bianca Godoi de Sá Carvalho, Gabriela de Oliveira Brack, Gabriele Lima Costa, Edlara Santos Gomes, Luan Veloso de Chagas Prais e Victor de Lima Triveloni pelos anos de convivência e companheirismo, pelos momentos felizes e por, mesmo à distância, permanecerem comigo sendo parte de quem eu sou.

A minha amiga e técnica do laboratório Claudia Campos Dela Marta, por todos os “puxões de orelha” e conselhos no início da minha formação e por todos os bons momentos e risadas durante o meu doutorado.

Ao Grupo de Estudo em Nutrição de Plantas da UNESP (Genplant) por ter me recebido de braços abertos e sempre me proporcionarem oportunidades de aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

Ao meu amigo Leonardo Henrique Sória por compartilhar comigo as dificuldades da vida acadêmica e me aliviar das angustias e frustrações através de momentos de reflexão e descontração sempre muito válidos.

Aos meus amigos Thiago Henrique Fachini e Jéssica Maria Pereira Matos por terem me acolhido e me refugiado em momento importante para a execução desse trabalho, me ajudando a limpar a mente e relaxar para seguir adiante com os desafios desta pesquisa.

Aos meus amigos Kevein Ruas de Oliveira e Gilmar da Silveira Sousa Junior e a Profa. Priscila Lupino Gratão pela oportunidade de desenvolver os estudos apresentados neste trabalho e em outros projetos, pelo aprendizado e por todo apoio nesta pesquisa.

Ao Prof. Eduardo Custódio Gasparino por possibilitar o estudo dos grãos de pólen apresentado neste trabalho e pelo ensinamento e disponibilidade de seu laboratório.

Por fim, gostaria de agradecer a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho e para meu desenvolvimento pessoal e profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

SUMÁRIO

| | Página |
|---|--------|
| RESUMO | iv |
| ABSTRACT | v |
| CAPÍTULO 1 – Considerações gerais | 1 |
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Revisão de literatura | 5 |
| 2.1 A função do boro no desenvolvimento reprodutivo vegetal | 5 |
| 2.2 A relação boro e silício no desenvolvimento reprodutivo das plantas | 8 |
| 2.3 A função do boro e do silício no sistema antioxidante em plantas de algodão | 9 |
| 2.4 A função do boro e do silício na produtividade e na qualidade de fibras do algodoeiro..... | 11 |
| 3. Referências | 13 |
| CAPÍTULO 2 – A adição de silício na aplicação foliar boratada no algodoeiro modula o sistema antioxidante atenuando a deficiência e a toxicidade de boro | 22 |
| Resumo | 22 |
| 1. Introdução. | 24 |
| 2. Material e Métodos | 26 |
| 2.1 Condições de crescimento | 26 |
| 2.2 Delineamento experimental e tratamentos | 28 |
| 2.3 Índice de turbidez da calda B associada a Si | 28 |
| 2.4 Coleta da parte aérea..... | 30 |
| 2.5 Avaliação do estresse oxidativo, prolina e glicina-betaína | 30 |
| 2.6 Análise nutricional de B, acúmulo de Si e produção de massa seca da parte aérea..... | 32 |
| 2.7 Análise estatística..... | 33 |
| 3. Resultado e Discussão..... | 33 |
| 3.1 Controle x Fatorial | 33 |
| 3.2 Teste de turbidez da calda e acúmulo foliar de B e Si..... | 34 |
| 3.3 Estresse oxidativo, prolina e glicina-betaína nas folhas de algodoeiro | 39 |
| 3.4 Produção de massa seca | 42 |
| 4. Conclusão | 43 |
| 5. Referências | 44 |

CAPÍTULO 3 – Adição de Si à calda boratada para aplicação foliar incrementa a eficiência de uso de boro pela flor e aumenta a produção de grãos de pólen .. 49

| | |
|--|----|
| Resumo | 49 |
| 1. Introdução. | 50 |
| 2. Material e Métodos | 52 |
| 2.1 Condições de crescimento | 52 |
| 2.2 Delineamento, parcela experimental e aplicação dos tratamentos..... | 53 |
| 2.3 Coleta das flores e avaliação da quantidade de grãos de pólen..... | 53 |
| 2.4 Massa seca, teor e acúmulo de B e Si, teor de carboidratos e eficiência de uso do B nas flores..... | 53 |
| 2.5 Análise estatística..... | 54 |
| 3. Resultado e Discussão..... | 55 |
| 3.1 Acúmulo de B e Si, teor de carboidratos, produção de massa seca e eficiência de uso de boro nas flores de algodoeiro | 55 |
| 3.2 Produção de grãos de pólen nas flores de algodoeiro | 58 |
| 4. Conclusão | 59 |
| 5. Referências | 59 |

CAPÍTULO 4 – Silício via foliar na fase reprodutiva do algodoeiro contribui com o boro para aumentar a produtividade e a qualidade da fibra 63

| | |
|--|----|
| Resumo | 63 |
| 1. Introdução. | 65 |
| 2. Material e Métodos | 67 |
| 2.1 Localização e características da área experimental..... | 67 |
| 2.2 Delineamento, parcela experimental e aplicação dos tratamentos..... | 69 |
| 2.3 Teste de homogeneidade da solução boro associado a silício | 70 |
| 2.4 Manejo fitossanitário..... | 71 |
| 2.5 Avaliações fisiológicas..... | 72 |
| 2.6 Amostragem e análise foliar do teor de Si e de B | 73 |
| 2.7 Produtividade, teor de Si e de B nas plumas e avaliação da qualidade da fibra | 74 |
| 2.8 Análise estatística..... | 74 |
| 3. Resultado e Discussão..... | 74 |
| 3.1 Estabilidade da mistura B associado a Si e teor de B e de Si no algodoeiro | 74 |
| 3.2 Concentração interna de CO ₂ , fotossíntese e eficiência do uso da água em plantas de algodão | 79 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3 Produtividade e qualidade da fibra..... | 81 |
| 4. Conclusão | 85 |
| 5. Referências | 85 |
| CAPÍTULO 5 – Considerações finais | 90 |

RELAÇÃO BORO E SILÍCIO EM PLANTAS DE ALGODÃO DEFICIENTES EM BORO

RESUMO - A maior exigência do boro (B) na fase reprodutiva do algodoeiro e baixa disponibilidade no solo é conhecida, implicando no fornecimento deste elemento à cultura, principalmente, via pulverização foliar, embora estudos sejam restritos. Há relatos indicando que o silício (Si) aumenta a produtividade do algodoeiro e outros constatando alto conteúdo de Si na flor e durante o desenvolvimento da fibra do algodão. Isso induziu alguns questionamentos, se o Si poderia auxiliar o B durante o desenvolvimento reprodutivo e se as associações desses elementos poderiam ampliar os seus efeitos benéficos. Para verificar esta interação entre B e Si, realizou-se a presente pesquisa, objetivando-se avaliar o efeito da aplicação foliar de B e de Si, isolados ou associados em algodoeiro, cultivado sob deficiência de B. Este estudo ratificou a importância da aplicação foliar de B no algodoeiro, especialmente por favorecer aspectos fisiológicos, incrementando a produção e viabilidade de grãos de pólen suficiente para aumentar a produtividade e a qualidade da fibra. Os resultados indicaram que o algodoeiro na fase reprodutiva é sensível a deficiência de boro e que é possível melhorar a eficácia da aplicação foliar de B na cultura com adição de Si na calda ao incrementar a eficiência de uso do B da flor, a produção de grãos de pólen. O fornecimento foliar de B também é eficaz em atenuar os efeitos deletérios da deficiência do micronutriente, e a adição de Si à calda boratada incrementou a produção de prolina e de glicina-betaína e reduziu a produção de H₂O₂ e MDA nas folhas. A aplicação foliar de B e de Si, isolados, na fase reprodutiva do algodoeiro têm efeito semelhante nas trocas gasosas, na produtividade e na qualidade da fibra mas a aplicação da mistura B associado a Si teve efeito somatório na qualidade da produção por incrementar a resistência a ruptura e diminuindo o índice de fibras curtas do algodoeiro.

Palavras-chave: Adubação boratada, elemento benéfico, estresse oxidativo, pulverização foliar, qualidade de fibra, viabilidade de grãos de pólen

BORON AND SILICON RELATIONSHIP IN COTTON PLANTS UNDER BORON DEFICIENCY

ABSTRACT - It is known worldwide that boron (B) is an important nutrient during the reproductive stage of cotton plants (flowering and boll development). This implies in the exogenous supply of this element to the crop, mainly through foliar spraying. Although studies are relatively scarce in the literature, some reports indicate that silicon (Si) could increase the productivity of cotton, other studies indicate that a high Si content is usually found in cotton flower and fiber. This has led to some enquiries, whether Si could be similar to B, playing a similar role, and whether the association of these elements could increase their beneficial effects during the reproductive stage of cotton plants. To verify the interaction between B and Si, this study was carried out aiming to evaluate the positive effects of B and Si foliar applications, associated or not, in cotton plants grown under B deficiency. This study has confirmed the importance of foliar B applied to cotton plants, improving physiological aspects and increasing the production and viability of pollen grains, leading to high productivity and high-quality fiber. Our results indicate that cotton plants, during the reproductive stage, are sensitive to B deficiency, and that it is possible to improve the efficiency of B foliar applications with Si addition, favoring plant efficiency in the use of B in the flowers, increasing the production and the viability of pollen. The foliar supply of B is also efficient in attenuating the deleterious effects of this micronutrient deficiency, and the addition of Si to the borate solution increased the production of proline and glycine-betaine, and reduced the production of H₂O₂ and MDA in leaves. Therefore, foliar applications of B and Si, isolated, in the reproductive stage of cotton plants, both had a similar effect on gas exchange, as well as fiber productivity and quality. However, the application of B associated with Si (B+Si) had a summatory effect on fiber production and quality by increasing the resistance to rupture and decreasing the cotton short fiber index.

Key words: Borated fertilization, beneficial element, oxidative stress, leaf spray, fiber quality, pollen grains productivity

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. Introdução

O baixo teor de boro (B) é um problema comum em regiões produtoras de algodão e ocorre principalmente, em solos ácidos, com textura arenosa e com baixo teor de matéria orgânica (Atique-Ur-Rehman et al., 2020). Esta desordem nutricional causa prejuízos importantes na produção e na qualidade de fibra da cultura (Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Khan et al., 2020; Wahid et al., 2020). Para solucionar este problema, a aplicação foliar do micronutriente é prática comum realizada pelos produtores de algodão, mas existe riscos para garantir alta eficiência pois a diferença entre a concentração adequada e a tóxica de B é pequena (Rahman et al., 2019; Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Brdar-Jokanović, 2020), sendo possível verificar fitotoxicidade desse elemento na cultura do algodão, quando aplicado, em altas concentrações (Wahid et al., 2020).

Nesse cenário de desordem nutricional por deficiência ou toxicidade de B, a aplicação do elemento benéfico silício (Si) tem se evidenciado promissora em plantas algodão (Souza Junior et al., 2019). Alguns estudos indicam haver uma possível relação benéfica entre o B e o Si, pois, há respostas do algodoeiro à aplicação foliar de Si em solos com baixo teor de B, havendo incremento da produção de massa seca das plantas cultivadas em condições controladas (Souza Junior et al., 2019) e da produtividade em condição de campo (Barros et al., 2019). Em adição, o Si pode incrementar a absorção de B (Souza Junior et al., 2019), e a produção de massa seca das plantas, contribuindo para aumentar a eficiência de uso do micronutriente.

O benefício agrônômico do B se destaca na fase reprodutiva das plantas (Leonard et al., 2014). Durante o estágio reprodutivo, as plantas apresentam maior exigência de B, comparado ao estágio vegetativo (Prado, 2021). Isso ocorre, pois nessa fase, durante a formação dos grãos de pólen, são utilizadas pectinas para a formação da parede celular (Golaszweska e Bednarska, 1999; Aouali et al., 2001), e, em caso de deficiência de B, a rigidez da parede celular é comprometida, modificando o formato e diminuindo a viabilidade dos grãos de pólen (Nyomora et

al., 2000; Iwai et al., 2006); além de diminuir o transporte de fotoassimilados das folhas para flores e frutos, e promover danos à formação da flor, das sementes e dos frutos (Oosterhuis e Zhao, 2001).

Na fase reprodutiva, o Si pode contribuir com a formação de pectinas presentes na estrutura da parede celular dos grãos de pólen, como observado em *Lychnis alba* (Crang e May, 1974) e em algodão (Boylston et al., 1990), favorecendo a resistência física da parede celular (Kido et al., 2015), a formação da flor e a produção e viabilidade dos grãos de pólen (Polster et al., 1978).

Além disso, a desordem nutricional causada pela carência ou excesso de B pode ocasionar aumento na produção das espécies reativas de oxigênio (ERO), causando danos oxidativos nas células, como observado em *Beta vulgaris* (Song et al., 2019) e *Pisum sativum* (Oliveira et al., 2020). O fornecimento adequado de B atenua os danos causados pelo estresse oxidativo, estimulando os primeiros mecanismos enzimáticos de defesa da planta (Aydin et al., 2019). Apesar de estes mecanismos serem conhecidos em plantas de algodão cultivadas sob estresse abiótico (Bharwana et al., 2013; Farooq et al., 2013; Moldes et al., 2013), os estudos relacionados ao sistema de defesa antioxidante não enzimático são escassos em plantas de algodão. No entanto, estes mecanismos de defesa das plantas devem ser considerados devido à sua importância, principalmente aqueles relacionados à ação da prolina (Hua et al., 2020) e da glicina-betaína (GB) (Ahmed et al., 2020; Sun et al., 2020). A prolina é um dos mais comuns osmólitos presentes nas plantas relacionado à tolerância a vários estresses abióticos (Gill e Tuteja, 2010) e também a neutralização de 1O_2 e $\cdot OH$, atenuando os danos da peroxidação lipídica (Das e Roychoudhury, 2014). Semelhante à prolina, a GB possui função osmótica e antioxidante, relacionada à sua contribuição na manutenção da integridade estrutural e funcional celular, possível, devido à interação entre a GB e domínios hidrofílicos e hidrofóbicos de complexos proteicos e membranosos nas células (Sun et al., 2020).

A desordem nutricional de B pode prejudicar também a produtividade e a qualidade de fibra de plantas de algodão (Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Khan et al., 2020; Wahid et al., 2020). A aplicação de Si pode mitigar estes efeitos deletérios, pois, durante o processo de formação de fibra, este elemento é

importante por produzir complexo com pectinas, caloses, taninos e amidos (Boylston et al., 1990), dado que, a concentração desse elemento é alta na fibra do algodão especialmente durante a sua fase de alongamento (aproximadamente do 1º ao 21º dia após a antese) (Boylston, 1988).

Dessa forma, é possível indicar, de modo hipotético, que os efeitos da aplicação foliar de B e de Si, de forma isolada na fase reprodutiva do algodoeiro, têm efeitos semelhantes no desenvolvimento reprodutivo, ao incrementar a produção e a viabilidade de grãos de pólen, favorecendo a produção de massa seca e diminuindo o estresse oxidativo nas folhas de algodoeiro. Havendo esse efeito semelhante do Si e do B na planta, a mistura desses elementos, na calda, para aplicação foliar, tenha efeito somatório no desenvolvimento reprodutivo do algodoeiro, reduzindo o estresse oxidativo nas folhas e incrementando a produção e viabilidade de grãos de pólen, bem como a produtividade e a qualidade da fibra (Figura 1).

Para a formulação da mistura B associado ao Si, no entanto, é conhecido que existe risco da polimerização do Si em solução aquosa, que produz polímeros do elemento, com forma química diferente da absorvida (H_4SiO_4) pelas plantas (H_4SiO_4) (Birchall, 1995; Zhuravlev, 2000).

O processo de polimerização do Si em solução aquosa é afetado pelo valor do pH, pela concentração de Si na solução (Haynes, 2019) e pela presença de estabilizantes (Souza Junior et al., 2020). O uso do sorbitol promove estabilidade do Si em solução, na forma monomérica (H_4SiO_4), diminuindo a taxa de polimerização desse elemento benéfico, favorecendo a sua absorção, quando aplicado via foliar. Tal efeito pode ser verificado em plantas de *Gossypium hirsutum* (Souza Junior et al., 2019, 2020), *Helianthus annuus* (Flores et al., 2019; Peixoto et al., 2020); *Pisium sativum* (Oliveira et al., 2020) e *Solanum lycopersicum* (Moraes et al., 2020), mas, sem adição de B na calda de pulverização.

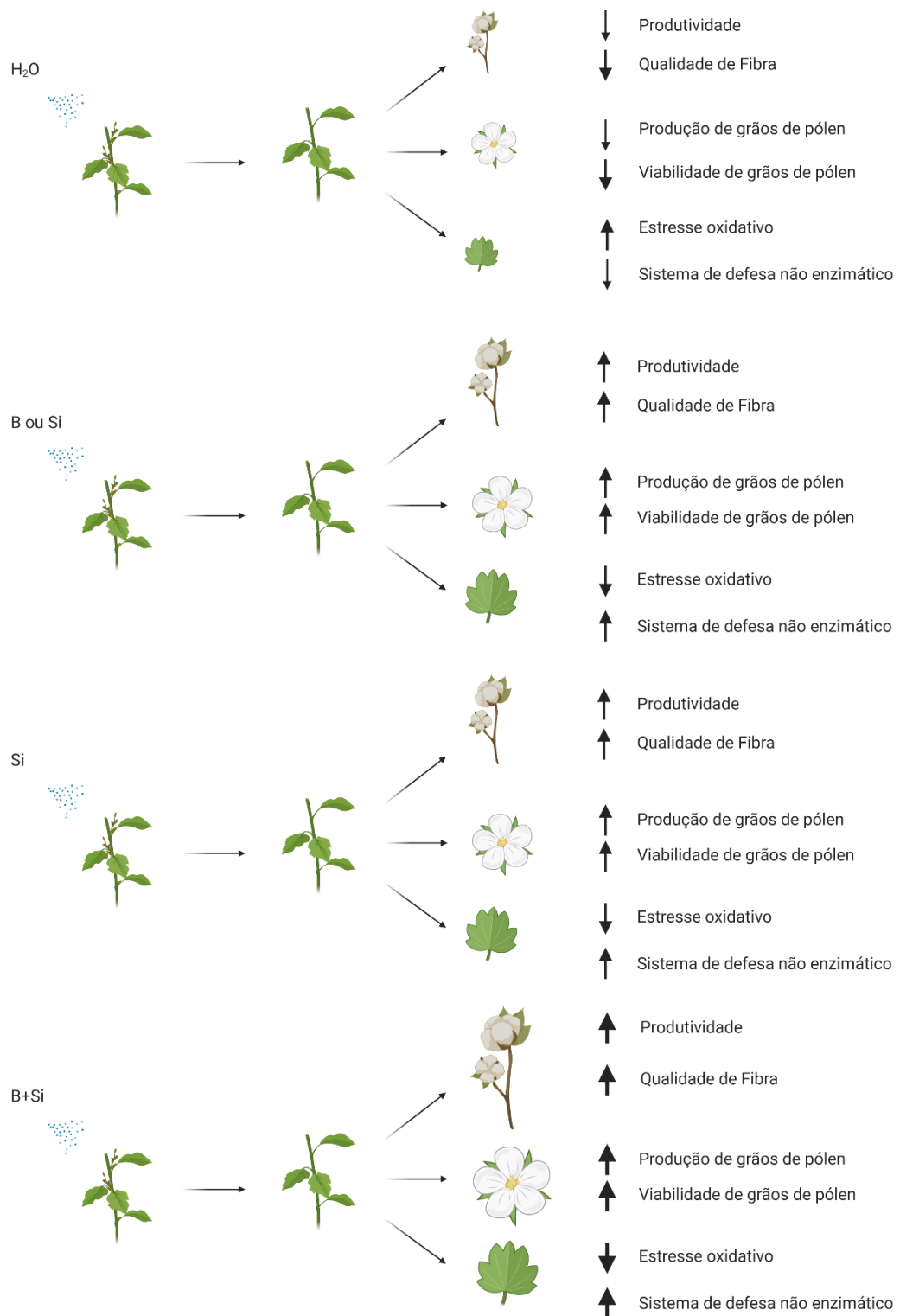


Figura 1. Esquema hipotético do efeito da aplicação foliar de água (controle), de boro (B), de silício (Si) e da mistura boro + silício (B+Si) na folha (sistema enzimático e estresse oxidativo); na flor (produção e viabilidade de grãos de pólen); e na fibra (Produtividade e qualidade da fibra) de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B. Figura criada com o BioRender.com

As informações sobre as concentrações adequadas de B e Si para a mistura em calda, que sejam estáveis, são incipientes, constituindo um fator preocupante, pois, as respostas das culturas dependem da forma química disponível dos elementos em solução, para garantir a absorção foliar.

2. Revisão de Literatura

2.1 A função do boro no desenvolvimento reprodutivo vegetal

Durante o estágio reprodutivo, as plantas apresentam maior exigência nutricional de B, comparado ao estágio vegetativo (Prado, 2021). Isso é indicado pela alta concentração do micronutriente no pistilo e no estame, em comparação à raiz, folha, caule e flor (Dell e Huang, 1997; Rerkasem et al., 2020). A deficiência de B pode afetar vários estágios do processo reprodutivo, como a germinação do grão de pólen, o crescimento do tubo polínico e o processo de polinização (Dell e Huang, 1997). Apesar da importância da fase reprodutiva das plantas, estudos sobre os efeitos do B no desenvolvimento floral, e na viabilidade e produção de grãos de pólen em plantas de algodão são escassos.

O B possui papel fundamental na formação dos grãos de pólen (O'Neill et al., 2004; Voxeur e Fry 2014; Fang et al., 2019), que ocorre nas anteras, em um processo dependente da diferenciação e da interação dos microsporócitos e do "tapete" formado pelas células somáticas (Clément et al., 1998). Os microsporócitos originam os micrósporos, enquanto as células do "tapete" são importantes para maturação dos micrósporos, fornecendo materiais para a construção da parede celular do grão de pólen, composta, principalmente, por pectina, calose e esporopolenina (Clément et al., 1998). Conforme o pólen se desenvolve, a pectina é secretada das células do "tapete" para o espaço das anteras, sendo usada para construir as paredes do grão de pólen (Golaszewska e Bednarska, 1999; Aouali et al., 2001). Nesse processo, o B forma complexos boratos com diversos compostos polihidroxi, incluindo pectina e ramnogalacturonas-II (O'Neill et al., 2004; Voxeur e Fry, 2014; Fang et al., 2019), e atua regulando a porosidade e a rigidez da parede imatura dos grãos de pólen em desenvolvimento (Willats et al., 2001; Iwai et al.,

2006;). Na deficiência de B, a pectina formada com ramnogalacturonas-II, sem complexo borato, pode ser liberada das paredes do ápice dos tubos polínicos, porém sem formação de rede de polissacarídeo rígida, induzindo à má formação dos grãos de pólen (Nyomora et al., 2000; Iwai et al., 2006;).

O aumento do estresse oxidativo, que pode ocorrer devido à deficiência ou toxicidade de B, também prejudica o desenvolvimento de grãos de pólen (Fu et al., 2011; Jia et al., 2017; Ren et al., 2019). Isso ocorre, quando há um desbalanço entre a produção de ERO e o sistema de defesa antioxidante presente na planta, ocasionando danos oxidativos, sendo comum em plantas cultivadas sob estresse biótico e abiótico (Foyer e Noctor, 2000).

Existem estudos em plantas cultivadas sob estresse (déficit hídrico), os quais afirmam que, o aumento na esterilidade dos grãos de pólen está associado à elevação do estresse oxidativo (Fu et al., 2011). Resultados semelhantes, também foram relatados por Ren et al. (2019) e por Jia et al. (2017), ao estudarem a deterioração de grãos de pólen de diversas espécies ornamentais após armazenamento criogênico, que atua como estresse abiótico, aumentando a produção de ERO que desnaturalizam proteínas, decompõem os ácidos nucleicos e destroem a integridade de membrana celular das células que compõem o pólen, deteriorando os grãos de pólen.

Os efeitos do estresse oxidativo na produção e viabilidade de grãos de pólen em plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B não são conhecidos. Contudo, em outras espécies, é relatado que o aumento do sistema de defesa antioxidante diminui as ERO, e, conseqüentemente, favorecem a produção e viabilidade de grãos de pólen (Fu et al., 2011; Jia et al., 2017; Ren et al., 2019).

O fornecimento adequado de B atenua o estresse oxidativo, estimulando os mecanismos de respostas das plantas ao estresse (Aydin et al., 2019). A pulverização foliar de B, aplicada no início do estágio reprodutivo das plantas, é eficiente em fornecer o micronutriente para as culturas, aumentando a produção e a viabilidade de grãos de pólen, bem como a manutenção da florada e o desenvolvimento dos frutos, como observado em *Malus domestica* (Nyomora et al., 2000) e *Olea europaea* (Perica et al., 2001). Os autores atribuem o efeito benéfico

da aplicação foliar do B, ao importante papel do micronutriente no desenvolvimento e no crescimento do tubo polínico.

O tubo polínico é formado por uma camada externa de pectocelulose e uma camada interna de calose (Cai et al., 2011). Este é formado, principalmente, por pectinas, secretadas pelo complexo de Golgi (Hasegawa et al., 1998), sendo ausente na camada calósica (Hao et al., 2013). A parede do ápice dos tubos polínicos consistem de substâncias pécticas (Kim et al., 2000) e a ramnogalacturonas-II também está presente nos tubos polínicos em crescimento (Matoh et al., 2000).

O crescimento do tubo polínico é um processo dependente de citoesqueletos de actina (Guan et al., 2013; Rounds e Bezanilla, 2013; Gao et al., 2016;) que estão localizados ao longo do tubo polínico, como cabos de actina longitudinais; na região subapical como filamentos curtos e densos; e no ápice do tubo polínico, como filamentos de actina altamente dinâmicos (Cheung e Wu, 2008). A função do B no crescimento do tubo polínico está associada à estrutura dos citoesqueletos, aumentando as proteínas de actina e contribuindo para a manutenção no arranjo dos filamentos de actina na região subapical dos tubos polínicos (Fang et al., 2019).

A deficiência de B causa inibição da germinação do grão de pólen e retardo do crescimento do tubo polínico (Nyomora et al., 2000; Fang et al., 2019; Sharafi e Raina, 2020), formando calosidades nas pontas do tubo polínico, o que ocasiona enrijecimento, com conseqüente diminuição do crescimento dos tubos polínicos, como observado em *Lilium longiflorum* (Li et al., 1996) e em *Picea meveri* (Wang et al., 2003). Além disto, a deficiência de B, também promove alterações na morfologia do tubo polínico (Dickinson, 1978; Polster et al., 1978; Fang et al., 2019), contribuindo para diminuição na fecundação das flores.

O crescimento do tubo polínico é processo fundamental para que ocorra a fertilização. Para a fertilização da flor, o tubo polínico cresce e penetra, a partir do tecido transmissor do estilete, no óvulo presente no ovário (Sharafi e Raina, 2020). Posteriormente, inicia-se a formação de frutos, sendo um dos estágios mais críticos no ciclo de vida de uma planta com flor (Raina e Kaul, 2019).

2.2 A relação boro e silício no desenvolvimento reprodutivo das plantas

Em estudo clássico sobre a relação B e Si no desenvolvimento floral em *Lilium longiflorum* (Thunb), Polster et al., (1978) inferiram que o Si possui ação sinérgica ao B, estimulando a produção e a germinação dos grãos de pólen. Estudos em *Gerbera jamesonii* (Savvas et al., 2002; Kamenidou et al., 2010); em *Rosa damascena* (Farahani et al., 2020); em *Solanum lycopersicum* (Miyake e Takahashi, 1978) e em *Triticum* spp. (Maghsoudi et al., 2015) evidenciaram a importância do Si para o desenvolvimento reprodutivo, incrementando a viabilidade e a germinação dos grãos de pólen, assim como o crescimento do tubo polínico. No entanto, nesses trabalhos, os mecanismos biológicos do Si não estão bem claros, e o papel do Si para o desenvolvimento de flores e para a produção e viabilidade de grãos de pólen em plantas de algodão permanece desconhecido.

O fornecimento de Si via foliar favorece o crescimento floral, incrementando o diâmetro e a altura de flores de *Zinnia elegans* e *Gerbera jamesonii* (Kamenidou et al., 2010). Após absorvido pela planta, o elemento pode se ligar a compostos orgânicos (Neu et al., 2017; Klotzbücher et al., 2018; Mantovani et al., 2018; Frazão et al., 2020) especialmente componentes da parede celular, como a hemicelulose (He et al., 2015). Este efeito do Si pode gerar estratégia de “energia a baixo custo”, pois a sua ligação com compostos orgânicos da parede celular teria baixo custo energético para a planta, e com isso a planta pouparia energia, ao diminuir a necessidade da síntese de compostos estruturais como lignina, que tem alta demanda de energia para sua síntese (Raven, 1983; Neu et al., 2001). Deste modo, o elemento benéfico favorece o crescimento floral por incrementar a eficiência de uso do boro neste órgão, ao favorecer o metabolismo vegetal, especialmente os processos ligados à parede celular.

Nas estruturas reprodutivas, o Si pode contribuir com o B em sua função estrutural, pois esse elemento benéfico é destacado como um dos componentes elementares presentes na estrutura da parede dos grãos de pólen (Crang e May, 1974). Durante o metabolismo do Si, pode ocorrer a formação de complexos com pectinas, caloses, taninos e amidos (Boylston et al., 1990), que são compostos utilizados para a formação da parede dos grãos de pólen (Golaszweska e

Bednarska, 1999; Aouali et al., 2001). Em adição, pode ocorrer a formação de ligações mistas de Si com (1;3,1;4)- β -D-glucano, aumentando a resistência física da parede celular dos grãos de pólen (Kido et al., 2015), que, em caso de deficiência de B, tem sua rigidez comprometida (Nyomora et al., 2000; Iwai et al., 2006).

O Si também pode contribuir com o B para o crescimento do tubo polínico. A função direta do Si no crescimento do tubo polínico é pouco relatada na literatura. Contudo, há indícios de que, durante o desenvolvimento da parede celular do tubo polínico, o Si fica preso nos poros da matriz dessa parede, em um processo de auto condensação (Leroux et al., 2013). Nesse processo, o Si reage com grupos hidroxilas na parede celular e aumenta a sua plasticidade, facilitando a expansão celular (Boylston et al., 1990), como observado durante o alongamento de células foliares de arroz (Hossain et al., 2002, 2007) e em fibras de algodão (Boylston et al., 1990).

2.3 A função do boro e do silício no sistema antioxidante em plantas de algodão

A toxicidade de B ocasiona aumento das ERO, provocando danos oxidativos nas células de plantas de algodão (Hua et al., 2020). Durante a redução de O_2 para H_2O no processo fotossintético pode haver transferência de energia para o O_2 , formando o oxigênio singlet (1O_2), que possui alta reatividade comparado ao O_2 . Pode, ainda, ocorrer a transferência de um, dois ou três elétrons para O_2 e formar as ERO, superóxido ($O_2^{\cdot-}$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($\cdot OH$), respectivamente, que podem ocasionar danos, devido à peroxidação lipídica (Gratão et al., 2005).

Os principais mecanismos de eliminação de ERO das plantas incluem enzimas, como a superóxido dismutase (SOD), a catalase (CAT), a ascorbato peroxidase (APX) e a glutathiona peroxidase (GPX). A SOD atua na dismutase do $O_2^{\cdot-}$ em H_2O_2 enquanto a CAT, a APX e a GPX na desintoxicação de H_2O_2 transformando-o em H_2O (Gratão et al., 2005; Hua et al., 2020).

O fornecimento adequado de B atenua estresses oxidativos, estimulando os primeiros mecanismos de respostas ao estresse, favorecendo a ativação de

enzimas como a APX e a GPX (Aydin et al., 2019). A deficiência do micronutriente, no entanto, reduz o sistema antioxidante, por diminuir as vias metabólicas para a biossíntese destas enzimas (Cakmak e Römheld, 1997; Brown et al., 2002).

O papel do Si no sistema antioxidante enzimático nas folhas é bastante relatado na literatura em plantas de algodão cultivadas sob estresses abióticos (Bharwana et al., 2013; Farooq et al., 2013; Moldes et al., 2013). O fornecimento de Si em plantas cultivadas sob estresse diminui os danos oxidativos, por diminuir o conteúdo de H₂O₂, a peroxidação lipídica e o extravasamento de eletrólitos (Moldes et al., 2013). Por extensão, o elemento benéfico possui importante função na modulação de enzimas antioxidantes, havendo aumento na transcrição de genes envolvidos como resposta de defesa das plantas em diversas espécies (Liang et al., 2007; Khandekar e Leinzer, 2011; Moldes et al., 2013).

A função do B e do Si no sistema antioxidante enzimático nas folhas é bastante explorada e discutida na literatura. Apesar disso, o sistema antioxidante não enzimático deve ser considerado, sendo ausentes estudos com este foco em plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B. Em revisão sobre toxicidade de B, Hua et al. (2020) indicaram que o processo antioxidante não enzimático é meritório para regular a neutralização de ERO nas células das plantas. Dentre os compostos enzimáticos antioxidantes, os autores destacam a prolina e a glicina-betaína (GB). A prolina é um dos mais comuns osmólitos presentes nas plantas relacionado à tolerância a vários estresses abióticos (Gill e Tuteja, 2010) e também a neutralização de ¹O₂ e [•]OH, atenuando os danos da peroxidação lipídica (Das e Roychoudhury, 2014). Semelhante à prolina, a GB possui função osmótica e antioxidante, relacionada à sua contribuição na manutenção da integridade estrutural e funcional celular, possível, devido à interação entre a GB e domínios hidrofílicos e hidrofóbicos de complexos proteicos e membranosos nas células (Sun et al., 2020).

O fornecimento adequado de B contribui para manutenção da integridade da membrana celular, diminuindo o extravasamento de eletrólitos em plantas de algodão (Ahmed et al., 2014). Estudo clássico evidencia a relevância do B na função estrutural e na funcionalidade das biomembranas, principalmente, da membrana plasmática (Cakmak e Römheld, 1997) devido à sua capacidade de

formar complexos boratos, com diferentes compostos polihidroxi, incluindo pectina, glicosilinositol, fosforilceramidas e ramnogalacturonas (O'Neill et al., 2004; Voxeur e Fry, 2014).

O fornecimento de Si para as plantas, também, contribui para aumentar a integridade física da membrana, rareando o extravasamento de eletrólitos ocasionados pela peroxidação lipídica, pois, após absorvido, o elemento benéfico se deposita na forma de opala nos espaços extracelulares e na parede celular, podendo aumentar a resistência das células (Zargar et al., 2019). Estudos evidenciam a eficiência da aplicação de Si e B, isolados (Aydin et al., 2019; Farooq et al., 2019; Oliveira et al., 2020) ou associados (CHEN et al., 2019), como agentes mitigadores do estresse oxidativo em diversas espécies cultivadas sob estresse abiótico, porém, o efeito da aplicação foliar de B e Si, isolados ou associados, no estresse oxidativo e no sistema antioxidante não enzimático em plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B, permanece desconhecido.

2.4 A função do boro e do silício na produtividade e na qualidade de fibras do algodoeiro

A deficiência de B reduz a produtividade e a qualidade da fibra do algodoeiro, sendo problema comum em regiões produtoras desta cultura, especialmente, em solos ácidos, textura arenosa e com baixo teor de matéria orgânica (Ahmed et al., 2020; Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Wahid et al., 2020).

A função do B na produção de fibra de algodoeiro pode ser relacionada ao importante papel do micronutriente na reprodução das plantas, onde sua deficiência promove danos à formação da flor, germinação de grãos de pólen e até na formação de sementes e de frutos, como relatado anteriormente. Em adição, a desordem nutricional por deficiência de B deforma os feixes vasculares do xilema, reduzindo o transporte de água e de nutrientes pelo floema (Li et al., 2017), diminuindo a redistribuição de fotoassimilados das folhas para os frutos, em plantas de algodão (Oosterhuis e Zhao, 2001; Zhao e Oosterhuis, 2003), com consequente acúmulo de amido nas folhas. O excesso de amido acumulado destrói, fisicamente, a estrutura dos cloroplastos (Cave et al., 1981) e o acúmulo de hexoses pode

suprimir as expressões gênicas que codificam enzimas fotossintéticas, reduzindo a taxa de fotossíntese (Jeannette et al., 2000; Moore et al., 2003; Han et al., 2008), com conseqüente diminuição da produtividade.

Outro prejuízo advindo da deficiência de B no algodoeiro seria na qualidade da produção, pois, esse micronutriente participa da biossíntese de lignina, pectina, celulose e hemicelulose presentes na fibra (O'Neill et al., 2004) e, conseqüentemente, sua falta diminui a resistência à ruptura, o comprimento e a fineza das fibras e aumenta o índice de fibras curtas (Atique-Ur-Rehman et al., 2020) depreciando a qualidade da fibra.

Descobertas recentes indicaram que a aplicação foliar de Si em algodoeiro deficiente em B incrementa a produção de massa seca das plantas de algodão cultivadas em condição controlada (Souza Junior et al., 2019, 2020) e a sua produtividade em condição de campo (Barros et al., 2019). O Si, semelhante ao B, contribui para manutenção dos feixes vasculares das plantas e fluxo contínuo de água e nutriente pelos vasos do xilema (Javaid et al., 2019). Após absorvido, o Si é depositado nas células da epiderme na forma de uma camada dupla Si-Cutícula-Si (Kim et al., 2002), nas células guardas (Vandegeer et al., 2020), ou em células especializadas em armazenar Si, como os fitólitos (Kumar et al., 2017, 2019). Em adição, o Si compõe as pectinas, as caloses e os taninos, os quais também conferem maior resistência física celular (Schwarz, 1973; Waterkeyn, 1981; Boylston et al., 1990).

Durante a fase de alongamento da fibra de algodão, a concentração de Si é alta nas fibras (Boylston, 1988), evidenciando a importância desse elemento benéfico na formação da fibra (Boylston et al., 1990). Por conseqüente, é possível que, a aplicação foliar de Si na fase reprodutiva da cultura tenha acréscimo da concentração de Si na fibra e possa afetar sua formação e favorecer os seus atributos qualitativos, mas, esses efeitos, ainda são desconhecidos. A melhoria das características tecnológicas da fibra de algodão, como o índice de fibras curtas, comprimento, resistência à ruptura e *micronaire* tem implicação agroeconômica importante, pois, determinam a qualidade do produto e seu valor no mercado.

3. Referências

Ahmed N, Ali MA, Hussain S, Hassan W, Ahmad F, Danish S (2020) Essential micronutrients for cotton production. In.: Ahad S, Hasanuzzaman M (Eds.) **Cotton production and uses**. Singapura: Springer, p. 105–117.

Aouali N, Laporte P, Clément C (2001) Pectin secretion and distribution in the anther during pollen development in *Lilium*. **Planta** 213:71–79.

Atique-Ur-Rehman QR, Hussain A, Sardar H, Sarwar N, Javeed HMR, Maqbool A, Hussain M (2020) Soil applied boron (B) improves growth, yield and fiber quality traits of cotton grown on calcareous saline soil. **Plos One** 15:e0231805.

Aydin M, Tombuloglu G, Sakcali MS, Hakeem KR, Tombuloglu H (2019) Boron alleviates drought stress by enhancing gene expression and antioxidant enzyme activity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19:545–555.

Barros TC, Prado RM, Roque CG, Arf MV, Vilela RG (2019) Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition** 42:458–465.

Bharwana AS, Ali S, Farooq MA, Abbas F (2013) Alleviation of lead toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes suppressed lead uptake and oxidative stress in cotton. **Journal of Bioremediation and Biodegradation** 4:e1000187.

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

Boylston EK (1988) Presence of silicon in developing cotton fibers. **Journal of Plant Nutrition** 11:1739–1747.

Boylston EK, Hebert JJ, Hensarling TP, Bradow JM, Thibodeaux DP (1990) Role of silicon in developing cotton fibers. **Journal of Plant Nutrition** 13:131–148.

Brdar-Jokanović M (2020) Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. **International Journal of Molecular Sciences** 21:e1424.

Brown PH, Bellaloui N, Wimmer MA, Bassil ES, Ruiz J, Hu H, Pfeffer H, Dannel F, Römheld V (2002) Boron in Plant Biology. **Plant Biology** 4:205–223.

Cai G, Faleri C, Casino CDC, Emons AMC, Cresti M (2011) Distribution of callose synthase, cellulose synthase, and sucrose synthase in tobacco pollen tube is controlled in dissimilar ways by actin filaments and microtubules. **Plant Physiology** 155:1169–1190.

Cakmak I, Römheld V (1997) Boron deficiency-induced impairments of cellular functions in plants. **Plant and Soil** 193:71–83.

- Cave G, Tolley LC, Strain BR (1981) Effect of carbon dioxide enrichment on chlorophyll content, starch content and starch grain structure in *Trifolium subterraneum* leaves. **Physiologia Plantarum** 51:171–174.
- Chen D, Xue R, Long J, Lin X, Lin Y, Jia L, Zeng R, Song Y (2019) Effects of boron, silicon and their interactions on cadmium accumulation and toxicity in rice plants. **Journal of Hazardous Materials** 367:447–455.
- Chen Y, Smagula Jm, Litten W, Dunham S (1998) Effect of boron and calcium foliar sprays on pollen germination and development, fruit set, seed development, and berry yield and quality in lowbush blueberry (*Vaccinium angustifolium* Ait.). **Journal of the American Society for Horticultural Science** 123:524–531.
- Cheung AY, Wu H (2008) Structural and signaling networks for the polar cell growth machinery in pollen tubes. **Annual Review of Plant Biology** 59:547–572.
- Clément C, Laporte P, Audran JC (1998) The loculus content and tapetum during pollen development in Liliaceae. **Sexual Plant Reproduction** 11:94–106.
- Crang RE, May G (1974) Evidence for silicon as a prevalent elemental component in pollen wall structure. **Canadian Journal of Botany** 52:2171–2174.
- Das K, Roychoudhury A (2014) Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in Environmental Science** 2:e53..
- Dell B, Huang L (1997) Physiological response of plants to low boron. **Plant and Soil** 193:103–120.
- Dickinson DB (1978) Influence of borate and pentaerythritol concentrations on germination and tube growth of *Lilium longiflorum* pollen. **Journal of American Society of Horticulture Science** 103:413-416.
- Exley C (2015) A possible mechanism of biological silicification in plants. **Frontiers in Plant Science** 6:e853.
- Fang KF, Du BS, Zhang Q, Xing Y, Cao QQ, Qin L (2019) Boron deficiency alters cytosolic Ca²⁺ concentration and affects the cell wall components of pollen tubes in *Malus domestica*. **Plant Biology** 21:343–351.
- Farahani H, Sajedi NA, Madani H, Changizi M, Naeini MR (2020) Effect of foliar-applied silicon on flower yield and essential oil composition of damask rose (*Rosa damascena* Miller) under water deficit stress. **Silicon** 1:1–10.
- Farooq MA, Ali S, Hameed A, Ishaque W, Mahmood K, Iqbal Z (2013) Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 96:242–249.

- Flores RA, Arruda EM, Souza Junior JP, Prado RM, Santos ACA, Aragão AS, Pedreira NG, Costa CF (2019) Nutrition and production of *Helianthus annuus* in a function of application of leaf silicon. **Journal of Plant Nutrition** 42:137–144.
- Foyer CH, Noctor G (2000) Oxygen processing in photosynthesis: Regulation and signalling. **New Phytologist** 146:359-388.
- Frazão JJ, Prado RM, Souza Júnior JP, Rossatto DR (2020) Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports** 10:e12492.
- Fu G, Song J, Xiong J, Li Y, Chen H, Le M, Tao L (2011) Changes of oxidative stress and soluble sugar in anthers involve in rice pollen abortion under drought stress. **Agricultural Sciences in China** 10:1016–1025.
- Gao QF, Gu LL, Wang HQ, Fei CF, Fang X, Hussain J, Sun SJ, Dong JY, Liu H, Wang YF (2016) Cyclic nucleotide-gated channel 18 is an essential Ca²⁺ channel in pollen tube tips for pollen tube guidance to ovules in *Arabidopsis*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 113:3096–3101.
- Gill SS, Tuteja N (2010) Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry** 48:909-930.
- Golaszewska B, Bednarska E (1999) Immunocytochemical localization of pectins in the maturing anther of *Allium cepa* L. **Folia Histochemica et Cytobiologica** 37:199-208.
- Gratão PL, Polle A, Lea PJ (2005) Azevedo, R. A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology** 32:481-494.
- Guan Y, Guo J, Li H, Yang Z (2013) Signaling in pollen tube growth: Crosstalk, feedback, and missing links. **Molecular Plant** 6:1053-1064.
- Han S, Chen LS, Jiang HX, Smith BR, Yang LT, Xie CY (2008) Boron deficiency decreases growth and photosynthesis, and increases starch and hexoses in leaves of citrus seedlings. **Journal of Plant Physiology** 165:1331–1341.
- Hao H, Chen T, Fan L, Li R, Wang X (2013) 2,6-dichlorobenzonitrile causes multiple effects on pollen tube growth beyond altering cellulose synthesis in *Pinus bungeana* Zucc. **Plos One** 8:e76660.
- Hasegawa Y, Nakamura S, Kakizoe S, Sato M, Nakamura N (1998) Immunocytochemical and chemical analyses of Golgi vesicles isolated from the germinated pollen of *Camellia japonica*. **Journal of Plant Research** 111:421–429.

- Haynes RJ (2019) What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils? **Geoderma** 337:375–383.
- He C, Ma J, Wang L (2015) A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. **The New Phytologist** 206:1051–1062.
- Hepler PK, Kunkel JG, Rounds CM, Winship LJ (2012) Calcium entry into pollen tubes. **Trends in Plant Science** 17:32-38.
- Hossain MT, Mori R, Soga K, Wakabayashi K, Kamisaka S, Fujii S, Yamamoto R, Hoson T (2002) Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some other Poaceae seedlings. **Journal of Plant Research** 115:23–27.
- Hossain MT, Soga K, Wakabayashi K, Kamisaka S, Fujii S, Yamamoto R, Hoson T (2007) Modification of chemical properties of cell walls by silicon and its role in regulation of the cell wall extensibility in oat leaves. **Journal of Plant Physiology** 164:385–393.
- Hua T, Zhang R, Sun H, Liu C (2020) Alleviation of boron toxicity in plants: Mechanisms and approaches. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 27:1-41.
- Iwai H, Hokura A, Oishi M, Chida H, Ishii T, Sakai S, Satoh S. (2006) The gene responsible for borate cross-linking of pectin Rhamnogalacturonan-II is required for plant reproductive tissue development and fertilization. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 103:16592–16597.
- Javaid T, Farooq MA, Akhtar J, Saqib ZA, Anwar-Ul-Haq M (2019) Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na⁺, Cl⁻ and mineral ions. **Plant Physiology and Biochemistry** 141:291–299.
- Jeannette E, Reyss A, Grégory N, Gantet P, Prioul JL (2000) Carbohydrate metabolism in a heat-girdled maize source leaf. **Plant, Cell & Environment** 23:61–69.
- Jia MX, Shi Y, Di W, Jiang XR, Xu J, Liu Y (2017) ROS-induced oxidative stress is closely related to pollen deterioration following cryopreservation. **In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant** 53:433–439.
- Kamenidou S, Cavins TJ, Marek S (2010) Silicon supplements affect floricultural quality traits and elemental nutrient concentrations of greenhouse produced gerbera. **Scientia Horticulturae** 123:390–394.

- Khan MA, Wahid A, Ahmad M, Tahir MT, Ahmed M, Ahmad S, Hasanuzzaman M (2020) World cotton production and consumption: An overview. In: Ahmad S, Hasanuzzaman M (Eds.) **Cotton production and uses**. Singapura: Springer, p. 1–7.
- Khandekar S, Leisner S (2011) Soluble silicon modulates expression of *Arabidopsis thaliana* genes involved in copper stress. **Journal of Plant Physiology** 168:699–705.
- Kido N, Yokoyama R, Yamamoto T, Furukawa J, Iwai H, Satoh S, Nishitani K (2015) The matrix polysaccharide (1;3,1;4)-2-d-glucan is involved in silicon-dependent strengthening of rice cell wall. **Plant and Cell Physiology** 56:268–276.
- Kim S, Dong J, Lord EM (2004) Pollen tube guidance: The role of adhesion and chemotropic molecules. In: Schatten GP (Ed.) **Current topics in developmental biology**. San Diego: Elsevier Academic Press, p.61-76.
- Kim SG, Kim KW, Park EW, Choi D (2002) Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. **Phytopathology** 92:1095–1103.
- Klotzbücher T, Klotzbücher A, Kaiser K, Vetterlein D, Jahn R, Mikutta R (2018) Variable silicon accumulation in plants affects terrestrial carbon cycling by controlling lignin synthesis. **Global Change Biology** 24:e183–e189.
- Kumar S, Adiram-Filiba N, Blum S, Sanchez-Lopez JA, Tzfadia O, Omid A, Volpin H, Heifetz Y, Goobes G, Elbaum R (2019) Siliplant1 (Slp1) protein precipitates silica in sorghum silica cells. **Journal of Experimental Botany** 71:6830-6843.
- Kumar S, Milstein Y, Bami Y, Elbaum M, Elbaum R (2017) Mechanism of silica deposition in sorghum silica cells. **New Phytologist** 213:791–798.
- Law C, Exley C (2011) New insight into silica deposition in horsetail (*Equisetum arvense*). **BMC Plant Biology** 11:1-9.
- Leonard A, Holloway B, Guo M, Rupe M, Yu G, Beatty M, Zastrow-Hayes G, Meeley R, Llaca V, Butler K, Stefani T, Jaqueth J, Li B (2014) Tassel-less1 encodes a boron channel protein required for inflorescence development in maize. **Plant and Cell Physiology** 55:1044–1054.
- Leroux O, Leroux F, Mastroberti AA, Santos-Silva F, Van Loo D, Bagniewska-Zadworna A, Van Hoorebeke L, Bals S, Popper ZA, Mariath JEA (2013) Heterogeneity of silica and glycan-epitope distribution in epidermal idioblast cell walls in *Adiantum raddianum* laminae. **Planta** 237:1453–1464.

- Li M, Zhao Z, Zhang Z, Zhang W, Zhou J, Xu F, Liu X (2017) Effect of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Scientific Reports** 7: 1–9.
- Li YQ, Zhang HQ, Pierson ES, Huang FY, Linskens HF, Hepler PK, Cresti M (1996) Enforced growth-rate fluctuation causes pectin ring formation in the cell wall of *Lilium longiflorum* pollen tubes. **Planta** 200:41–49.
- Liang Y, Sun W, Zhu YG, Christie P (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution** 147:422–428.
- Mantovani C, Prado RM, Pivetta KFL (2018) Silicon foliar application on nutrition and growth of Phalaenopsis and Dendrobium orchids. **Scientia Horticulturae** 241:83–92.
- Matoh T, Takasaki M, Kobayashi M, Takabe K (2000) Boron nutrition of cultured tobacco BY-2 cells. III. Characterization of the boron-rhamnogalacturonan II complex in cells acclimated to low levels of boron. **Plant and Cell Physiology** 41:363–366.
- Miyake Y, Takahashi E (1978) Silicon deficiency of tomato plant. **Soil Science and Planta Nutrition** 24:175-189.
- Moldes CA, Lima Filho OF, Camiña JM, Kiriachek SG, Molas ML, Tsai SM (2013) Assessment of the effect of silicon on antioxidant enzymes in cotton plants by multivariate analysis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 61:11243–11249.
- Moore B, Zhou L, Rolland F, Hall Q, Cheng WH, Liu YX, Hwang I, Jones T, Sheen J (2003) Role of the Arabidopsis glucose sensor HXK1 in nutrient, light, and hormonal signaling. **Science** 300:332–336.
- Moraes DHM, Mesquita M, Bueno AM, Flores RA, Oliveira HFE, Lima FSR, Prado RM, Battisti R (2020) Combined effects of induced water deficit and foliar application of silicon on the gas exchange of tomatoes for processing. **Agronomy** 10:e1715.
- Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports** 7:1–8.
- Nyomora MAS, Brown PH, Pinney K, Polito VS (2000) Foliar application of boron to almond trees affects pollen quality. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 125:265–270.

O'Neill MA, Ishii T, Albersheim P, Darvill AG (2004) RHAMNOGALACTURONAN II: Structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. **Annual Review of Plant Biology** 55:109–139.

Oliveira KR, Souza Junior JP, Bennett SJ, Checchio MV, Alves RC, Felisberto G, Prado RM, Gratão PL (2020) Exogenous silicon and salicylic acid applications improve tolerance to boron toxicity in field pea cultivars by intensifying antioxidant defence systems. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 201:e110778.

Oosterhuis DM, Zhao D (2001) Effect of boron deficiency on the growth and carbohydrate metabolism of cotton. In: Horts WJ, Schenk MK, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer B, Goldbach H, Olf HW, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schuvert S, Wirém NV, Wittenmayer L (EDs) **Plant Nutrition**. Dordrecht: Springer, p.166–167.

Peixoto MM, Flores RA, Couto CA, Pacheco HDN, Prado RM, Souza Junior JP, Castro Netto JA, Ribeiro DG (2020) Silicon application increases biomass yield in sunflower by improving the photosynthesizing leaf area. **Silicon** 10:1–6.

Perica S, Brown PH, Connell JH, Nyomora MAS, Dordas C, Hu H, Stangoulis J (2001) Foliar boron application improves flower fertility and fruit set of olive. **HortScience** 36:714–716.

Pierson ES, Miller DD, Callaham DA, Van Aken J, Hackett G, Hepler PK (1996) Tip-localized calcium entry fluctuates during pollen tube growth. **Developmental Biology** 174:160–173.

Polster J, Schwenk M, Bengsch E (1978) The role of boron, silicon and nucleic bases on pollen tube growth of *lilium longiflorum* (L.). **Zeitschrift fur Naturforschung - Section C Journal of Biosciences** 47:102–108.

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

Rahman MT, Haque MM, Mortuza MGG, Hossain MS, Chowdhury MSN (2019) Altering growth characters and seed cotton yield under foliar application of boron. **International Journal of Plant & Soil Science** 27:1–5.

Raina M, Kaul V (2019) Assessment of stigma receptivity via papillar integrity in *Kigelia pinnata* (Bignoniaceae). **Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences** 89:867–875.

Raven JA (1983) The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews** 58:179–207.

Ren R, Jiang X, Di W, Li Z, Li B, Xu J, Liu Y (2019) HSP70 improves the viability of cryopreserved *Paeonia lactiflora* pollen by regulating oxidative stress and apoptosis-like programmed cell death events. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture** 139:53–64.

Rerkasem B, Jamjod S, Pusadee T (2020) Productivity limiting impacts of boron deficiency, a review. **Plant and Soil** 15:1-8.

Rounds CM, Bezanilla M (2013) Growth mechanisms in tip-growing plant cells. **Annual Review of Plant Biology** 64:243–265.

Savvas D, Manos G, Kotsiras A, Souvaliotis S (2002) Effects of silicon and nutrient-induced salinity on yield, flower quality and nutrient uptake of gerbera grown in a closed hydroponic system. **Journal of Applied Botany** 76:153–158.

Schwarz K (1973) A bound form of silicon in glycosaminoglycans and polyuronides. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 70:1608–1612.

Sharafi Y, Raina M (2020) Effect of boron on pollen attributes in different cultivars of *Malus domestica* L. **National Academy Science Letters** 13:1–6, 2020.

Song B, Hao X, Wang X, Yang S, Dong Y, Ding Y, Wang Q, Wang X, Zhou J (2019) Boron stress inhibits beet (*Beta vulgaris* L.) growth through influencing endogenous hormones and oxidative stress response. **Soil Science and Plant Nutrition** 65:346–352.

Souza Junior JP, Prado RM, Sarah MMS, Felisberto G (2019) Silicon mitigates boron deficiency and toxicity in cotton cultivated in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 182:805–814.

Souza Junior JP, Prado RM, Soares MB, Silva JLF, Guedes VHF, Sarah MMS, Cazetta JO (2020) Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:95-103.

Sun H, Luo M, Zhou X, Zhou Q, Sun Y, Ge W, Wei B, Cheng S, Ji S (2020) Exogenous glycine betaine treatment alleviates low temperature-induced pericarp browning of ‘Nanguo’ pears by regulating antioxidant enzymes and proline metabolism. **Food Chemistry** 306:e125626.

Takano J, Noguchi K, Yasumori M, Kobayashi M, Gajdos Z, Miwa K, Hayashi H, Yoneyama T, Fujiwara T (2002) Arabidopsis boron transporter for xylem loading. **Nature** 420:337–340.

Vandegeer RK, Zhao C, Stewart XC, Wuhrer R, Hall CR, Hartley SE, Tissue DT, Johnson SN (2020) Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K⁺ efflux and consequently reduces stomatal conductance. **Physiologia Plantarum** 171:358-370.

Voxeur A, Fry SC (2014) Glycosylinositol phosphorylceramides from *Rosa* cell cultures are boron-bridged in the plasma membrane and form complexes with rhamnogalacturonan II. **The Plant Journal** 79:139–149.

Wahid MA, Saleem M, Irshad S, Khan S, Cheema MA, Saleem MF, Tung AS (2020) Foliar feeding of boron improves the productivity of cotton cultivars with enhanced boll retention percentage. **Journal of Plant Nutrition** 43:2411–2424.

Wang Q, Lu L, Wu X, Li Y, Lin J (2003) Boron influences pollen germination and pollen tube growth in *Picea meyeri*. **Tree Physiology** 23: 345–351.

Waterkeyn L (1981) Cytochemical localization and function of the 3-linked glucan callose in the developing cotton fibre cell wall. **Protoplasma** 106:49–67.

Willats WGT, McCartney L, Mackie W, Knox JP (2001) Pectin: Cell biology and prospects for functional analysis. **Plant Molecular Biology** 47:9-27.

Zargar SM, Mahajan R, Bhat JÁ, Nazir M, Deshmukh R (2019) Role of silicon in plant stress tolerance: opportunities to achieve a sustainable cropping system. **3 Biotech** 9:1–16.

Zhao D, Oosterhuis DM (2003) Cotton growth and physiological responses to boron deficiency. **Journal of Plant Nutrition** 26:855–867.

Zhuravlev LT (2000) The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 173:1–38.

CAPÍTULO 2 – A adição de silício na aplicação foliar boratada no algodoeiro modula o sistema antioxidante atenuando a deficiência e toxicidade de boro

RESUMO

A aplicação foliar de boro (B) pode corrigir a deficiência do micronutriente, mas em alta concentração do elemento na calda induz toxicidade nas plantas de algodão. Essa situação de estresse pode incrementar a produção de espécies reativas de oxigênio, com conseqüente estresse oxidativo. A adição de silício (Si) à calda para a pulverização foliar pode reduzir este efeito deletério da deficiência e toxicidade de B, mas faltam pesquisas para melhor compreensão dos mecanismos envolvidos. Para isso, realizou-se essa pesquisa objetivando-se avaliar o efeito da aplicação foliar de concentrações crescentes de B no algodoeiro para verificar se o Si adicionado à calda promove melhorias no metabolismo oxidativo. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação em sistema de cultivo sem solo com uso de solução nutritiva deficiente em B. Os tratamentos foram delineados em blocos inteiramente casualizados em esquema fatorial $5 \times 2 + 1$, sendo: cinco concentrações de B foliar (0,0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,5 g L⁻¹ de B), na ausência e na presença de Si (1,00 g L⁻¹); e um tratamento controle (sem deficiência de B). Quatro aplicações foliares foram realizadas, iniciando em B1 (primeiro botão floral completamente desenvolvido) com intervalo de quatro dias. A homogeneidade da solução silicatada foi determinada a partir de duas avaliações do índice de turbidez da calda com a mistura B+Si. Três semanas após a quarta aplicação foliar da mistura B+Si, todas as folhas foram coletadas para as avaliações do teor de B, de Si, de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), de malondialdeído (MDA), de prolina e de GB. A produção de massa seca da parte aérea foi mensurada e a eficiência de uso de B na parte aérea foi calculada. A adição de 1,00 g L⁻¹ de Si à calda boratada não incrementou o índice de turbidez da calda. A aplicação foliar de B, isolado ou associado ao Si incrementou o teor foliar de B e a massa seca; e reduziu a produção de H₂O₂, de MDA, de prolina e de GB, quando em concentração adequada. A aplicação de B na concentração mais elevada (2,5 g L⁻¹) ocasionou fitotoxicidade, aumentando o estresse oxidativo das plantas. Por outro lado, a adição de Si à calda boratada

favoreceu o mecanismo de defesa antioxidante não enzimático e, conseqüentemente, o desenvolvimento das plantas de algodão.

Palavras-chave: Estresse oxidativo. Glicina-Betaína. Prolina.

1. INTRODUÇÃO

A aplicação foliar de boro (B) é uma prática comum realizada pelos produtores de algodão em diversas regiões do mundo devido a natural deficiência de B nos solos (Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Khan et al., 2020; Wahid et al., 2020), especialmente em regiões tropicais. No entanto, a diferença entre a concentração adequada e a tóxica de B é pequena (Rahman et al., 2019; Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Brdar-Jokanovic, 2020), sendo possível verificar efeito tóxico deste elemento na cultura do algodão, quando aplicado via foliar em altas concentrações (Wahid et al., 2020).

A desordem nutricional de B, seja deficiência ou toxicidade, pode ocasionar aumento na produção das espécies reativas de oxigênio (ERO), causando danos oxidativos nas células, como observado em *Beta vulgaris* (Song et al., 2019), e *Pisum sativum* (Oliveira et al., 2020). O estresse oxidativo ocorre quando há um desbalanço entre a produção de ERO e o sistema antioxidante de defesa (enzimático e não enzimático), ocasionando os danos oxidativos (Kim et al., 2017; Fryzova et al., 2018). Entretanto este efeito da desordem nutricional de B no estresse oxidativo, em plantas de algodão, ainda permanece desconhecido.

Apesar dos mecanismos antioxidantes enzimáticos serem bastante conhecidos em plantas de algodão cultivadas sob estresse (Bharwana et al., 2013; Farooq et al., 2013; Moldes et al., 2013), os estudos voltados para o sistema de defesa antioxidante não enzimático são escassos, principalmente aqueles relacionados à ação da prolina (Hua et al., 2020) e da glicina-betaína (GB) (Ahmad et al., 2020; Hamani et al., 2020; Sun et al., 2020) em plantas de algodão.

Os danos oxidativos nas folhas das plantas também podem ser atenuados pelo fornecimento do elemento benéfico silício (Si), amplamente relatado em plantas de algodão cultivadas sob estresses abióticos (Bharwana et al., 2013; Farooq et al., 2013; Moldes et al., 2013). É possível que o benefício do Si em atenuar a deficiência de B se deve ao aumento do teor de clorofila e da eficiência fotossintética (Souza Júnior et al., 2019) ocasionado pela melhoria no sistema de defesa antioxidante da planta, visto em outras espécies (Liang et al., 2007; Moldes et al., 2013; Rady et al., 2019; Singh et al., 2019; Carneiro-Carvalho et al., 2020).

No entanto, faltam informações em plantas de algodão indicando se o Si via foliar é suficiente para atenuar a deficiência e, também, a toxicidade do boro.

Nesse contexto surge uma questão importante e inédita sobre a possibilidade de ampliar a eficiência da aplicação foliar de B para atenuar os efeitos deletérios da deficiência ou da toxicidade deste nutriente a partir da inclusão do Si à calda de pulverização, embora seja necessário haver compatibilidade química destes elementos em solução. Para isso, o risco de polimerização do Si em solução aquosa deve ser considerado.

É importante testar a hipótese que o incremento na concentração de B na calda, reduza o estresse oxidativo com consequente incremento no desenvolvimento de plantas de algodão. No entanto, o fornecimento de baixa ou alta concentração de B prejudica o desenvolvimento das plantas por incrementar a síntese de ERO e, conseqüentemente, o dano oxidativo. Com o efeito da pulverização foliar de B nas plantas de algodão, é possível que a adição de Si à calda boratada para pulverização foliar tenha efeito somatório (efeito do micronutriente e do elemento benéfico) em atenuar o estresse oxidativo e incrementar o desenvolvimento das plantas, principalmente sob concentrações sub ou supra ótimas de B (Figura 1).

Neste contexto, realizou-se essa pesquisa objetivando avaliar o efeito da aplicação foliar de concentrações crescentes de B no algodoeiro para verificar se o Si adicionado à calda promove ganhos para a correção da deficiência e da toxicidade do micronutriente por diminuir o estresse oxidativo a partir da síntese de prolina e de GB, aumentando a produção de massa seca da planta.

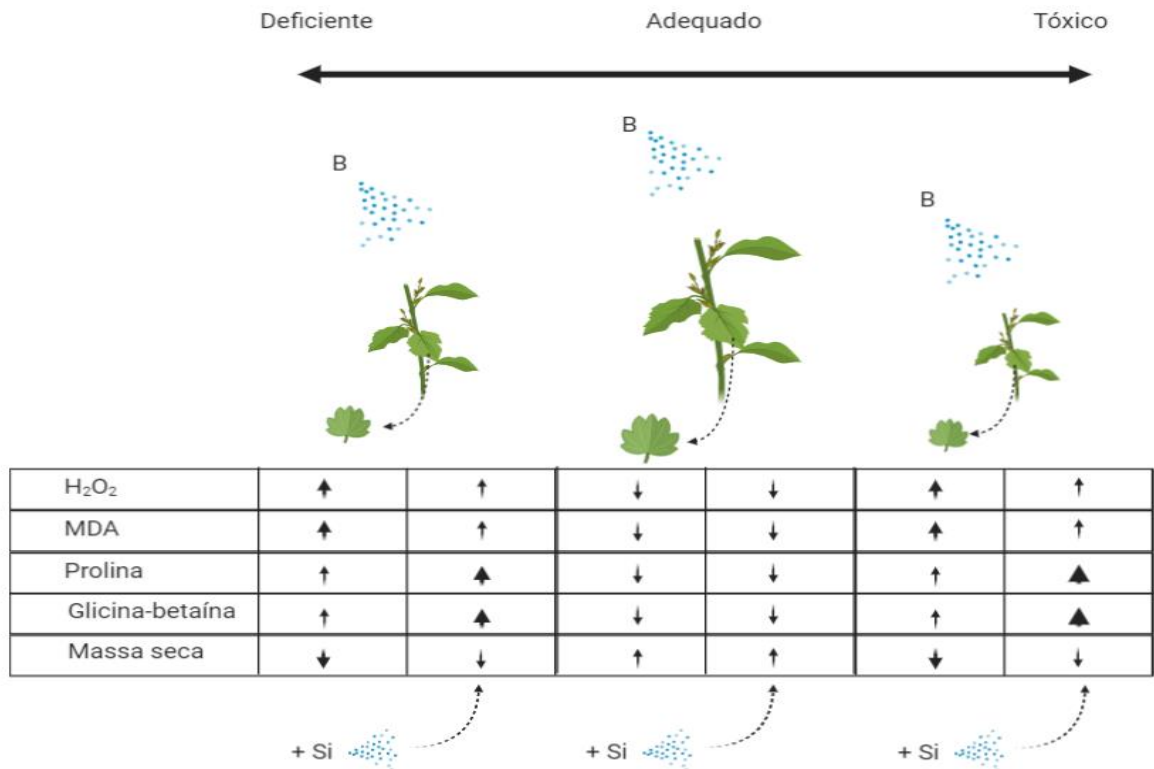


Figura 1. Esquema hipotético do efeito da adição de Si à calda boratada aplicada via foliar em plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B no estresse oxidativo e na produção de prolina, glicina-betaína e de massa seca das folhas. Figura criada com o BioRender.com

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Condições de crescimento

O experimento com algodão (Cultivar 954 GLT) foi desenvolvido no período de janeiro a maio de 2019, em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal, Brasil, cultivado em sistema de cultivo sem solo. A umidade relativa do ar ($78,4 \pm 4,4\%$), temperatura máxima ($35,1 \pm 6,3^{\circ}\text{C}$) e a temperatura mínima ($22,0 \pm 3,2^{\circ}\text{C}$) foram registradas com termo-higrômetro no interior da casa de vegetação durante o período experimental (Figura 2).

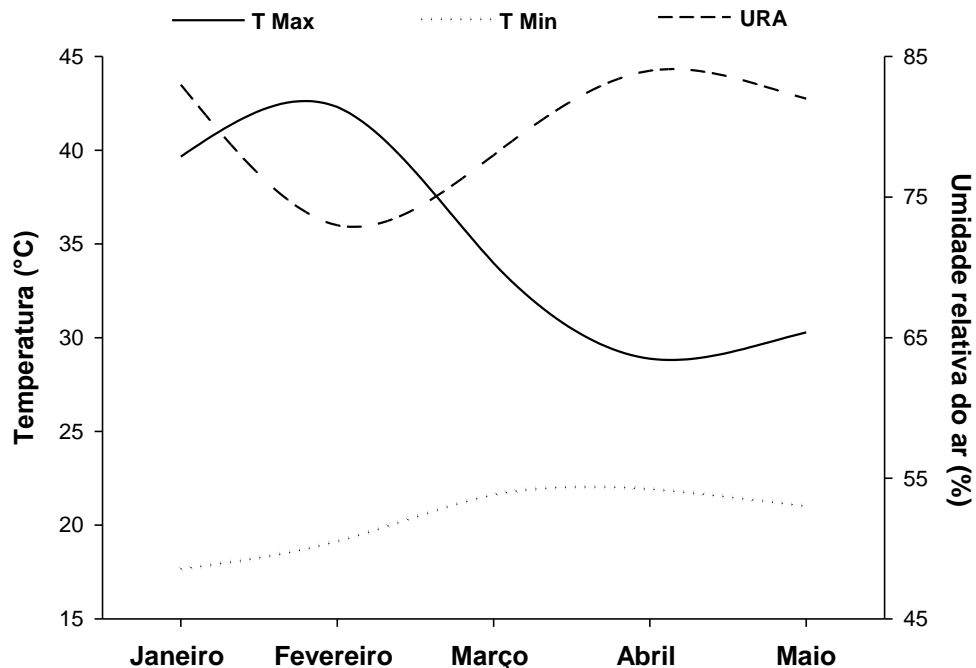


Figura 2. Temperatura máxima (T Max) e mínima (T Min) e umidade relativa do ar (URA) no interior da casa de vegetação durante o período experimental.

As sementes de algodão foram semeadas em bandejas, contendo areia, previamente lavada com água e solução HCL (0,3 M). Após a germinação, quatro plântulas foram transplantadas para vaso plástico com capacidade de 7 dm³ (diâmetro superior: 16 cm; diâmetro inferior: 11 cm; altura: 33 cm) preenchidos com 6 dm³ de areia. Foi realizado desbaste com as plantas em estágio vegetativo F2 (duas folhas completamente desenvolvidas), mantendo uma planta por vaso que constituiu a unidade experimental.

Com as plantas em estágio vegetativo F4 (quatro folhas completamente desenvolvidas), iniciou-se a aplicação de solução nutritiva completa (Hoagland e Arnon, 1950) com modificações referentes à fonte de ferro, a qual utilizou a Fe-EDDHMA; e redução apenas na concentração de B de 46,2 para 33,7 $\mu\text{mol L}^{-1}$, de modo a ocasionar deficiência moderada do micronutriente para plantas de algodão cultivadas em sistema de cultivo sem solo (Souza Junior et al., 2019). A solução nutritiva foi mantida em valor pH entre 5,5 e 6,5, ajustado com uso de solução NaOH (1 M) ou HCl (1 M).

Inicialmente, a solução nutritiva foi aplicada, por um período de sete dias, a 20% da concentração indicada por Hoagland e Arnon (1950). Após este período, a

concentração da solução foi incrementada para 40% por uma semana e, transcorrido então, para 60%, a qual foi mantida até o final do período experimental.

A drenagem do substrato para eliminação do excesso de sais foi realizada uma vez por semana. Para isso, foi adicionado ao substrato 700 mL de água deionizada a cada vaso, induzindo a drenagem da solução nutritiva, a qual foi descartada. Após 2 h, nova solução nutritiva foi aplicada para as plantas durante o período experimental.

2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi delineado em blocos inteiramente casualizados em esquema fatorial $5 \times 2 + 1$ com quatro repetições. Os tratamentos foram: cinco concentrações de B via foliar (0,0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,5 g L⁻¹ de B), na ausência e na presença de Si (1,00 g L⁻¹) em plantas cultivadas sob deficiência de B (33,7 μmol L⁻¹; e um tratamento controle sem deficiência do micronutriente aplicando-se 46,2 μmol L⁻¹ de B na solução nutritiva durante todo período experimental.

As concentrações de B na calda foram proporcionais a 0%; 33%; 66%; 100% e 166% da concentração recomendada por Görmus (2005), onde o autor indica a aplicação de 1,5 g L⁻¹ de B via foliar para o algodoeiro.

A concentração de Si a ser misturada com B, por sua vez, foi definida a partir da avaliação visual da calda para evitar usá-la com indício de polimerização, mensurada a partir do índice de turbidez.

2.3 Índice de turbidez da calda B associada a Si

Para o preparo da calda, o ácido bórico (B: 175 g kg⁻¹; densidade: 1,43 g cm⁻³; solubilidade em água a 20°C: 47,2 g L⁻¹) foi utilizado como fonte de boro, sendo o valor pH da calda boratada ajustado para 9,0 com uso da solução NaOH (1M). Como fonte de Si foi utilizado o silicato de potássio estabilizado com sorbitol (SiKE; Si: 115 g L⁻¹; K₂O: 113,85 g L⁻¹; sorbitol: 100 mL L⁻¹; pH:12,0). Foi também preparado calda potássica com 47 mg L⁻¹ de K, na forma de KCl, para equilibrar o macronutriente entre os tratamentos.

Duas avaliações do índice de turbidez de calda da mistura B+Si foram realizadas para determinar a homogeneidade da solução silicatada, pois o aumento deste valor na solução seria indicativo do avanço da polimerização do Si. Para este teste, a concentração de B da solução teve valor fixo igual a $2,5 \text{ g L}^{-1}$, sendo a maior concentração do micronutriente estudada neste experimento. A avaliação I consistiu em adicionar à solução boratada ($2,5 \text{ g L}^{-1}$) o silício em concentrações iguais a $1,00$; $1,25$ e $1,50 \text{ g L}^{-1}$ de Si; a avaliação II foi utilizada a mistura B ($2,5 \text{ g L}^{-1}$) com intervalos menores entre as concentrações de Si, iguais a $1,00$; $1,05$; $1,10$; $1,15$; $1,20$ e $1,25 \text{ g L}^{-1}$ de Si para aumentar a precisão da concentração do elemento benéfico na calda para uso na pulverização foliar. Em ambas as avaliações, foram utilizados SiKE como fonte de Si e H_3BO_3 como fonte de B para compor a solução com volume final de 50 mL , pH ajustado em $9,05 \pm 0,02$ com solução de HCl (1 M) ou NaOH (1 M) à temperatura de 20°C , e em três repetições. Após preparo da calda, o índice de turbidez foi mensurado com uso do aparelho turbidímetro microprocessado Tecnopon® (modelo TB1000) aos 0; 30; 60; 90; 120; 180; 240; 300 e 360 minutos, sendo também realizado registros fotográficos nesse período.

Para os registros fotográficos, uma câmera com 64 MP resolução 9238×6928 pixels foi utilizada. Os béqueres com as soluções foram acondicionados em bancada forrada com tecido de algodão na cor preta, sendo então fotografados. As imagens foram ajustadas com auxílio do Adobe Photoshop® para melhorar o contraste com o fundo preto sem alteração na coloração da solução.

A calda a ser utilizada foi preparada com os diferentes tratamentos e imediatamente aplicadas às plantas com pulverizador manual, visando à cobertura de todas as folhas da parte aérea. O volume de calda aplicado foi de $5,0 \text{ mL}$ de solução por vaso. As pulverizações foram realizadas no período da manhã entre 7 e 8 h iniciando-se nas plantas de algodão com estágio reprodutivo B1 (primeiro botão floral completamente desenvolvido) sendo realizadas quatro aplicações foliares com intervalo de quatro dias. A temperatura e umidade relativa do ar foram observadas com o uso de termo-higrômetro durante as pulverizações foliares estando a temperatura entre 20 e 23°C e a umidade relativa do ar acima de 85% ; sendo favoráveis para aplicação foliar (Prado, 2021).

Durante as aplicações foliares, a superfície do substrato foi coberta com algodão para evitar escorrimento da solução pulverizada para o substrato, de modo a garantir que a absorção dos elementos fosse totalmente via foliar.

2.4 Coleta da parte aérea

Três semanas após a quarta aplicação foliar da mistura B+Si, todas as folhas foram coletadas e imediatamente congeladas em nitrogênio líquido, sendo posteriormente armazenadas em freezer a -80°C para avaliação do estresse oxidativo.

O restante da parte aérea (galhos e caule) foi coletado, lavado com água, solução detergente (0,1%), solução HCl (0,1 %) e água deionizada e então armazenado em estufa de circulação forçada de ar a $65 \pm 5^{\circ}\text{C}$ até obtenção de massa constante. Posteriormente os galhos e caules foram pesados, moídos em moinho tipo Wiley e então armazenados para em seguida realizar as avaliações.

2.5 Avaliações do estresse oxidativo, prolina e glicina-betaína

Para avaliação do estresse oxidativo, a produção de malondialdeído (MDA) e de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) foram determinadas.

Inicialmente foram pesadas 0,4 grama de material vegetal congelado, armazenado a -80°C , e moídos com 20% (m/v) de polivililpirolidona e 0,1% de ácido tricloroacético (TCA). O material foi centrifugado a 11.000 rotações por minuto e 4°C por 10 minutos. O sobrenadante foi separado em tubos eppendorff contendo solução TCA a 20% e ácido triobarbutirico (TBA) a 5%. As amostras foram incubadas em banho maria por 30 minutos a 95°C , e, após este período, transferidas para banho em gelo por 10 minutos, para parar as reações, e então novamente centrifugadas a 11.000 rotações por minutos e 4°C por 10 minutos. Posteriormente foram realizadas as leituras das amostras em espectrofotômetro nos comprimentos de onda entre 535 e 600 nanômetros e o cálculo do MDA usando o coeficiente de extinção de $1,55 \cdot 10^{-5} \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Gratão et al., 2012).

O conteúdo de H_2O_2 foi determinado a partir da homogeneização dos tecidos vegetais moídos e congelados com TBA a 0,1% seguido por centrifugação a 11.000 rotações por minuto e $4^\circ C$ por 10 minutos. O sobrenadante foi transferido para tubos eppendorff contendo solução tampão (pH 7,5) e iodeto de potássio, sendo então incubados por uma hora em recipiente com gelo. Após este período foi realizada leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 390 nm, conforme metodologia descrita por Alexieva et al. (2001).

O teor de prolina foi determinado segundo método de Bates et al. (1973). O material vegetal foi descongelado à temperatura ambiente e 0,5 g de massa fresca foi previamente macerados em nitrogênio líquido, e posteriormente em 2 mL de ácido sulfossalicílico, com adição de mais 8 mL do mesmo reagente. O material macerado foi duplamente filtrado a partir de um funil de vidro com papel de filtro. Após a filtragem, foram pipetados em um tubo de ensaio de vidro de 1 mL de ácido acético glacial, 1 mL de ácido nihidrina e 1 mL do extrato vegetal. Os tubos foram então agitados e dispostos em banho-maria a $100^\circ C$ por 1 hora e, após banho-maria, colocados em gelo para cessar a reação sendo adicionado a eles 2 mL de tolueno com posterior agitação de 20 segundos. A leitura foi realizada em espectrofotômetro a 520 nm, adicionando-se 0,5 mL do sobrenadante em uma cubeta de quartzo.

A determinação do teor de glicina-betaína foi realizada de acordo com a metodologia de Grieve e Grattan (1983). Para tanto, 1 g de material vegetal congelado foi acondicionada em sacos de papel e levadas para secagem em estufa de circulação forçada de ar a $80^\circ C$ durante quatro dias, sendo posteriormente maceradas em cadinho de forma manual. Foram preparados extratos com adição de 5 mL de água deionizada para 0,125 g de material moído, os quais permaneceram sob agitação por 24 horas a $25^\circ C$. Os extratos foram misturados na proporção de 1:1 com H_2SO_4 (2 M), sendo em seguida mantidos em recipiente com gelo por 1 hora. Após isso, foi adicionado 0,1 mL de KI-I2 aos tubos, que foram então agitados e mantidos a $4^\circ C$ durante 16 horas. A solução de KI-I2 foi preparada previamente através da diluição de 15,7g de iodo e 20g de K em 100 ml de água destilada. Em seguida, os tubos foram centrifugados a 3500 rotações por minuto por 15 minutos à $0^\circ C$. O sobrenadante foi descartado, permanecendo cristais de

periodato no tubo, os quais foram dissolvidos em 4,5 mL de 1,2-dicloroetano. 2 horas e 30 minutos depois foi realizada a leitura da absorbância no comprimento de onda de 365 nm no espectrofotômetro Beckman DU 640 e calculado o teor de glicina-betaína.

2.6 Análise nutricional de B, acúmulo de Si e produção de massa seca da parte aérea

Após análise de estresse oxidativo e compostos antioxidantes não enzimáticos, as folhas foram descongeladas à temperatura ambiente e então lavados com água, solução detergente neutra (0,1%), solução HCl (0,1%) e água deionizada. Após descontaminação, as folhas foram armazenadas em estufa de circulação forçada de ar a $65 \pm 5^\circ\text{C}$ até obtenção de massa constante e então pesadas. Posteriormente, as folhas foram maceradas em cadinho de forma manual e misturadas com as respectivas amostras moídas de parte aérea (galhos e caules), coletadas anteriormente.

A massa seca da parte aérea foi composta pela massa seca das folhas restante das análises e da massa seca dos galhos e caules coletados inicialmente. Após mistura do material vegetal, o teor de B foi determinado a partir da digestão das amostras via seca, por queima em mufla a 400°C seguida por reação colorimétrica com azometina-H e determinação por leitura em espectrofotômetro colorimétrico (Bataglia et al., 1983). O teor de Si foi determinado a partir da digestão alcalina do material vegetal com H_2O_2 e NaOH em estufa a 90°C durante 4 h (Kraska e Breitenbeck, 2010), seguida por reação colorimétrica com molibdato de amônia em meio ácido (ácido oxálico e ácido clorídrico), sendo a determinação realizada por leitura em espectrofotômetro colorimétrico (Kondörfer et al., 2004).

O acúmulo de B e de Si foi calculado como sendo o produto entre o teor de B ou Si e a massa seca da parte aérea. Também, foi calculado a eficiência de uso de B a partir da razão entre o quadrado da massa seca da parte aérea e o conteúdo de B na parte aérea, conforme descrito por Siddiqi e Glass (1981).

2.7 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F), e quando significativo, ao estudo de regressão polinomial ou crescimento exponencial.

Para o estudo de polimerização foi utilizado modelo de crescimento exponencial. Modelos singulares, com um ou dois parâmetros foram testados, sendo aplicados os modelos com melhor ajuste dos dados, indicados pelo maior coeficiente de regressão a 5% pelo teste T.

As demais variáveis foram submetidas ao estudo polinomial, sendo testados os modelos matemáticos lineares e quadráticos, e aplicados os modelos que obtiveram os melhores ajustes aos dados. Para tanto, como critério de escolha do modelo, foi adotada a magnitude dos coeficientes de regressão polinomial significativos a 5% de probabilidade pelo teste T. Quando significativos, os pontos máximos e mínimos foram obtidos, por meio da derivação das equações.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Sisvar[®] (Ferreira, 2014) e os gráficos formulados com utilização do Sigmaplot[®].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Controle x Fatorial

As plantas de algodão cultivadas sem deficiência de B (Controle) apresentaram maior acúmulo de B, maior produção de massa seca da parte aérea e menor eficiência de uso do B, em comparação às plantas do tratamento fatorial (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de variância entre controle e tratamentos para acúmulo foliar de B e Si, peróxido de hidrogênio (H_2O_2), malondialdeído (MDA), prolina, glicino-betaína, massa seca e eficiência de uso do B na parte aérea de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B.

| | Acúmulo | | | |
|---------------|-----------------------------------|-------------------|----------------------------------|------------------------|
| | Boro | | | Silício |
| | ----- mg por planta ----- | | | |
| Test F | 257,1** | | | 48,3** |
| Controle | 754,1 | | | 6,9 |
| Fatorial | 376,2 | | | 14,1 |
| CV (%) | 9,47 | | | 10,6 |
| | H₂O₂ | MDA | Prolina | Glicino-betaína |
| | $\mu\text{mol g}^{-1}$ | g g^{-1} | $\mu\text{mol g}^{-1}$ | $\mu\text{g g}^{-1}$ |
| Test F | 173,20** | 198,87** | 120,02** | 12,59** |
| Controle | 328,36 | 2,03 | 23,33 | 4,54 |
| Fatorial | 484,96 | 3,44 | 61,66 | 5,89 |
| CV (%) | 4,17 | 4,98 | 9,93 | 10,91 |
| | Massa seca | | Eficiência de uso de boro | |
| | g | | mg g^{-1} | |
| Test F | 78,82** | | 38,68** | |
| Controle | 6,50 | | 0,04 | |
| Fatorial | 4,78 | | 0,10 | |
| CV (%) | 6,46 | | 10,4 | |

** - significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Aditivamente, o acúmulo de Si, o estresse oxidativo, mensurado pela produção de H_2O_2 e MDA, e a indução do sistema antioxidante não enzimático prolina e de GB foram menores nas plantas do tratamento controle (Tabela 1)

3.2 Teste de turbidez da calda e acúmulo foliar de B e Si

A adição de $1,00 \text{ g L}^{-1}$ de Si na forma de SiKE à calda boratada ($2,50 \text{ g L}^{-1}$), não incrementou o índice de turbidez da calda, com valor médio de 0,80 NDU (Figura 3a). A adição de $1,25 \text{ g L}^{-1}$ de Si à calda boratada ($2,50 \text{ g L}^{-1}$) incrementou, exponencialmente, o índice de turbidez, atingindo 1,73 NDU aos 360 minutos, após preparo da calda (Figura 3a). O aumento da concentração de Si para $1,50 \text{ g L}^{-1}$ resultou em polimerização imediata da calda, não sendo possível leitura do índice de turbidez. Portanto, notou-se que, a concentração de Si adequada na calda possa estar na faixa de $1,00$ a $1,25 \text{ g L}^{-1}$.

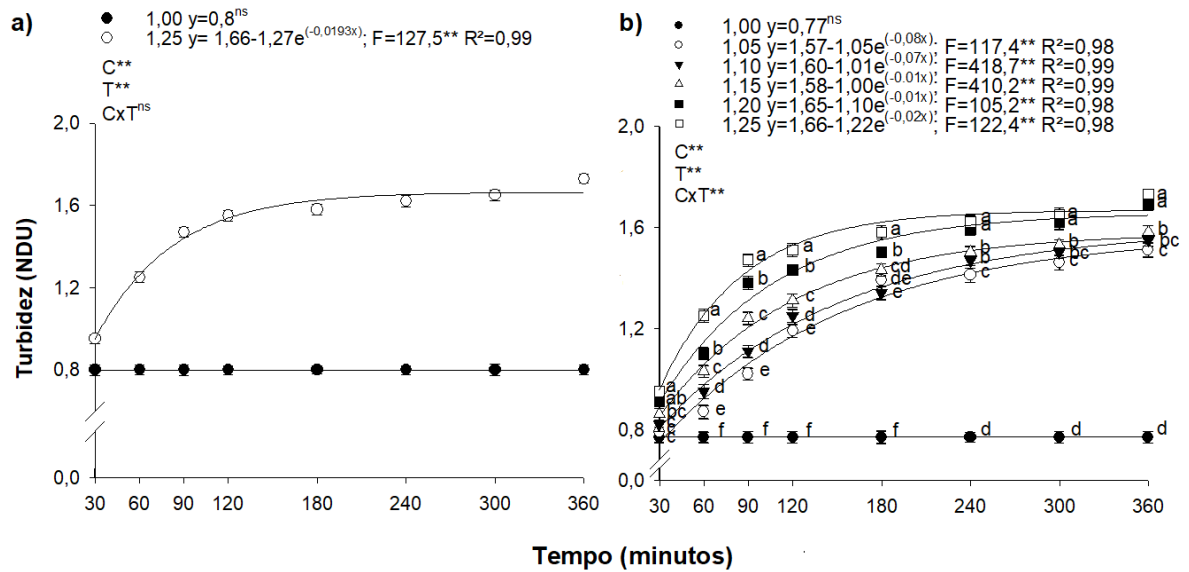


Figura 3. Índice de turbidez da mistura boro ($2,5 \text{ g L}^{-1}$) e diferentes concentrações (C) de silício ($1,00$ e $1,25 \text{ g L}^{-1}$) (a); e boro ($2,5 \text{ g L}^{-1}$) e diferentes concentrações (C) de Si ($1,00$; $1,05$; $1,10$; $1,15$; $1,20$ e $1,25 \text{ g L}^{-1}$) em função do tempo (T) após preparo da calda.

Para melhorar a acurácia da concentração de Si na calda, realizou-se a segunda avaliação, indicando que, a concentração limite para adição deste elemento na forma de SiKE, à solução boratada ($2,50 \text{ g L}^{-1}$ de B) é de $1,00 \text{ g L}^{-1}$ de Si, sem alteração no índice de turbidez com valor médio de $0,80 \text{ NDU}$ (Figura 3b). O aumento da concentração de $1,05$ a $1,25 \text{ g L}^{-1}$ de Si incrementou, com ajuste exponencial, o índice de turbidez com máximo de $1,51$; $1,55$; $1,8$; $1,69$ e $1,73 \text{ NDU}$, após 360 minutos, para as concentrações de $1,05$; $1,10$; $1,15$; $1,20$ e $1,25 \text{ g L}^{-1}$ de Si, respectivamente.

Quanto à coloração da solução, a mistura $1,00 \text{ g L}^{-1}$ de Si e $2,50 \text{ g L}^{-1}$ de B, não apresentou mudanças visíveis durante o período avaliado (Figura 4).

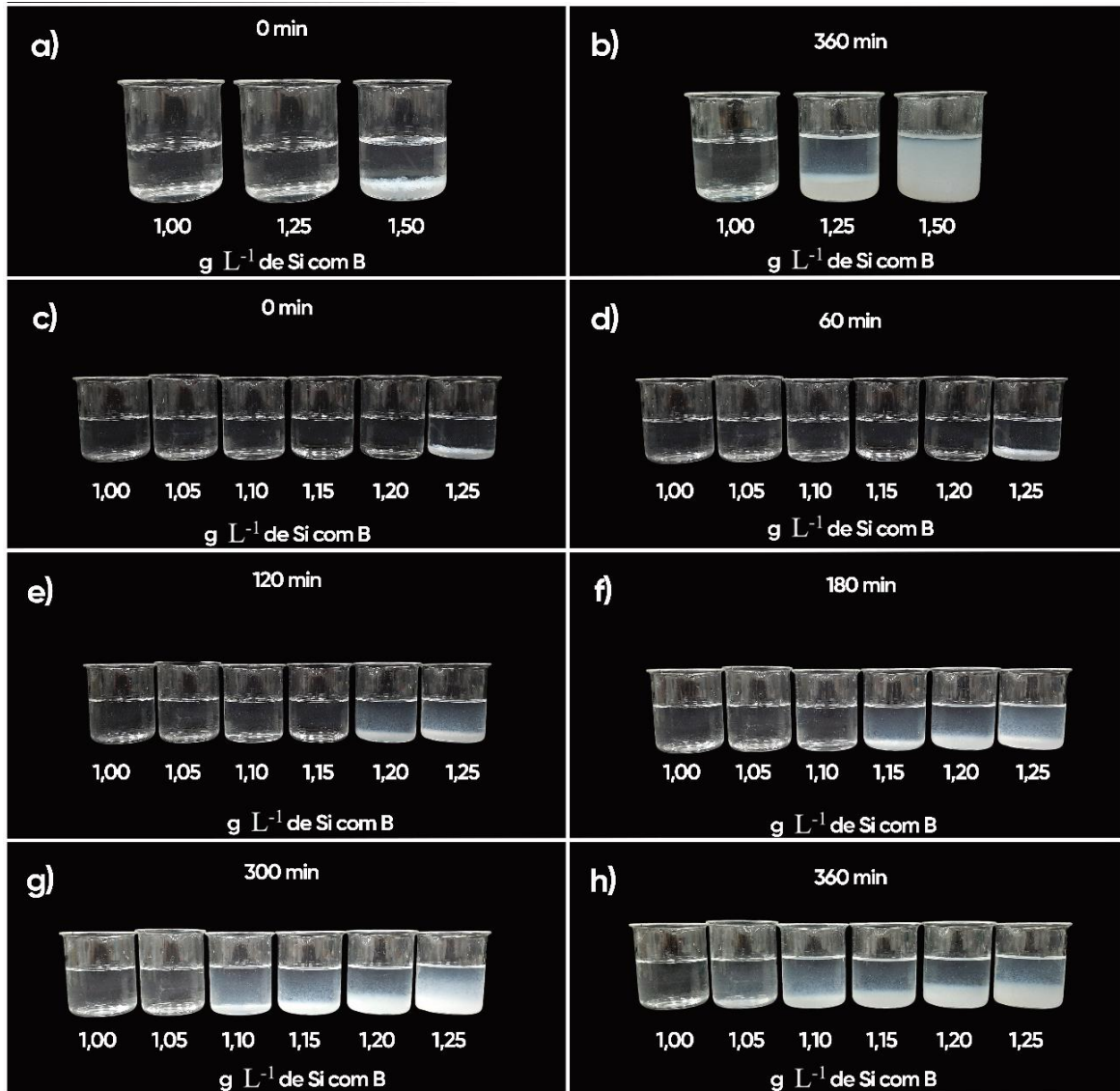


Figura 4. Avaliação da modificação colorimétrica visual na mistura boro ($2,50 \text{ g L}^{-1}$) + silício ($1,00$; $1,25$ e $1,50 \text{ g L}^{-1}$) imediatamente (a) e após 360 min (b) do preparo da calda; e boro ($2,50 \text{ g L}^{-1}$) + silício ($1,00$; $1,05$; $1,10$; $1,15$; $1,20$ e $1,25 \text{ g L}^{-1}$) aos 0 (c); 60 (d); 120 (e); 180 (f); 300 (g) e 360 (h) min do preparo da calda.

A adição de $1,25 \text{ g L}^{-1}$ de Si resultou na formação de polímeros, imediatamente, seguido do preparo da calda (Figura 4a), evoluindo para coloração turva e esbranquiçada da calda e aspecto gelatinoso, após 360 min (Figura 4b). A adição de $1,50 \text{ g L}^{-1}$ de Si à calda boratada ($2,50 \text{ g L}^{-1}$ de B) resultou em polimerização imediata da solução boratada, formando um gel, imediatamente, após o preparo da calda (Figura 4a) e aos 360 minutos (Figura 4b).

A segunda avaliação do índice de turbidez da calda, com maior número de concentrações de Si, permitiu observar que, não ocorreu modificação na coloração da calda boratada ($2,50 \text{ g L}^{-1}$) com a adição de Si entre $1,00$ a $1,25 \text{ g L}^{-1}$, com

exceção da formação de polímeros na concentração de $1,25 \text{ g L}^{-1}$, nos primeiros 60 min, após preparo da calda (Figura 4c, d). Aos 120 minutos, depois do preparo da calda (Figura 4e), o acréscimo de $1,25$ e $1,20 \text{ g L}^{-1}$ de Si à calda boratada modificou a coloração da solução, apresentando aspecto esbranquiçado.

Aos 180 minutos (Figura 4f), após preparo da calda, a partir da solução boratada com acréscimo de $1,25 \text{ g L}^{-1}$ de Si iniciou processo de gelatinização; aos 300 minutos (Figura 4g) verificou-se aspecto gelatinoso na solução boratada, com acréscimo de $1,20 \text{ g L}^{-1}$ de Si e modificação na coloração das soluções, com acréscimo de $1,15$ e $1,10 \text{ g L}^{-1}$ de Si.

Ao final do período de avaliação visual (360 minutos) da solução boratada com acréscimo de $1,25$ e $1,20 \text{ g L}^{-1}$ de Si apresentaram aspecto gelatinoso espesso, as soluções com $1,15$ e $1,10 \text{ g L}^{-1}$ apresentaram coloração esbranquiçada e a concentração de $1,05 \text{ g L}^{-1}$ de Si apresentou pequena modificação na coloração, indicando início da polimerização visível (Figura 4h).

O principal problema do Si em solução é a polimerização, que tem enorme implicação prática, pois, se houver esse processo, forma-se a sílica (SiO_2) insolúvel, comprometendo a absorção do elemento pelas plantas. Durante o processo de polimerização e de condensação do ácido monossilícico, são formados grupos silanol. Em seguida, a solução supersaturada do ácido é convertida em sua forma polimérica, constituindo partículas coloidais esféricas insolúveis (Zhuravlev, 2000) e a agregação dessas partículas formam cadeias longas no molde de redes, induzindo alteração visível da tonalidade da solução de translúcida para opaca ou turva (Figura 4).

A avaliação do índice de turbidez possibilitou detectar a mudança da tonalidade da solução silicatada, antes da fase do visível (Figura 3). Ficou evidenciado que, mesmo na alta concentração de B ($2,5 \text{ g L}^{-1}$ de B) é possível sua associação com Si na concentração máxima de $1,00 \text{ g L}^{-1}$, sem ocorrência importante da polimerização.

A estabilidade dessa solução silicatada deve ter recebido contribuição do estabilizante sorbitol presente no produto para garantir sucesso da aplicação foliar de Si (Souza Junior et al., 2020). Isso porque, a adição de estabilizantes constituiu uma alternativa eficiente para redução do processo de polimerização da calda

silicatada, incrementando a absorção foliar de Si em diversas culturas (Moraes et al., 2020; Oliveira et al., 2020; Peixoto et al., 2020), inclusive em plantas de algodão (Souza Junior et al., 2019; 2020).

A baixa polimerização do Si presente na calda boratada ($2,50 \text{ g L}^{-1}$ de B) pode ser confirmada neste trabalho pela eficiência da aplicação foliar, pois ficou claro o incremento do teor foliar do micronutriente na parte aérea (Figura 5a) e na flor (Figura 5b) e do elemento benéfico na parte aérea (Figura 5c) e na flor (Figura 5d) das plantas de algodão. Em adição, o sorbitol tem outro efeito no processo de absorção foliar de Si, pois ele diminui o ponto de deliquescência da gota depositada na superfície foliar diminuindo a velocidade de evaporação da água (Kubicki e Heaney, 2003), favorecendo absorção foliar (Prado, 2021).

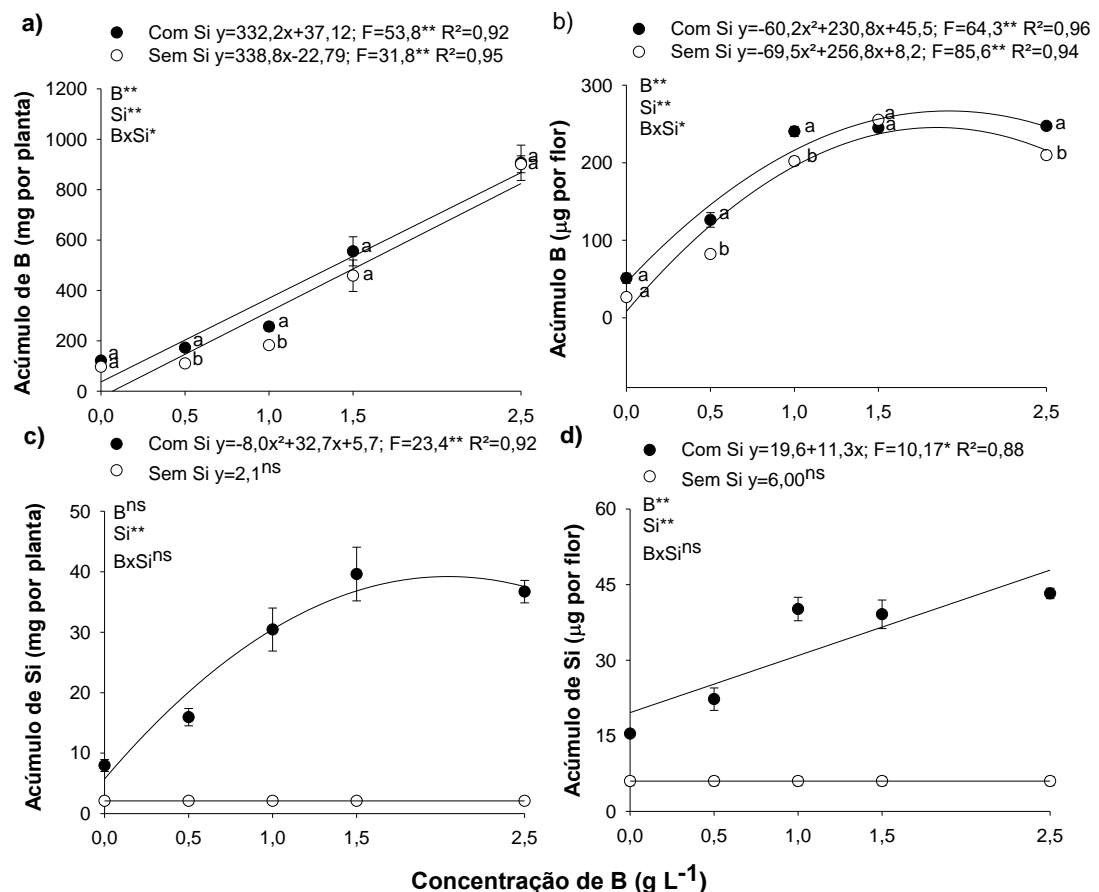


Figura 5. Acúmulo de boro na parte aérea (a) e na flor (b) e de silício na parte aérea (c) e na flor (d) de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B, em função de diferentes concentrações de boro (B) e silício (Si) aplicados via foliar.

3.3 Estresse oxidativo, prolina e glicina-betaína nas folhas de algodoeiro

A desordem nutricional boratada por deficiência (0,0 e 0,5 g L⁻¹ de B) ou toxicidade (2,5 g L⁻¹ de B) aumentou a produção de H₂O₂ (Figura 6a) e de MDA (Figura 6b).

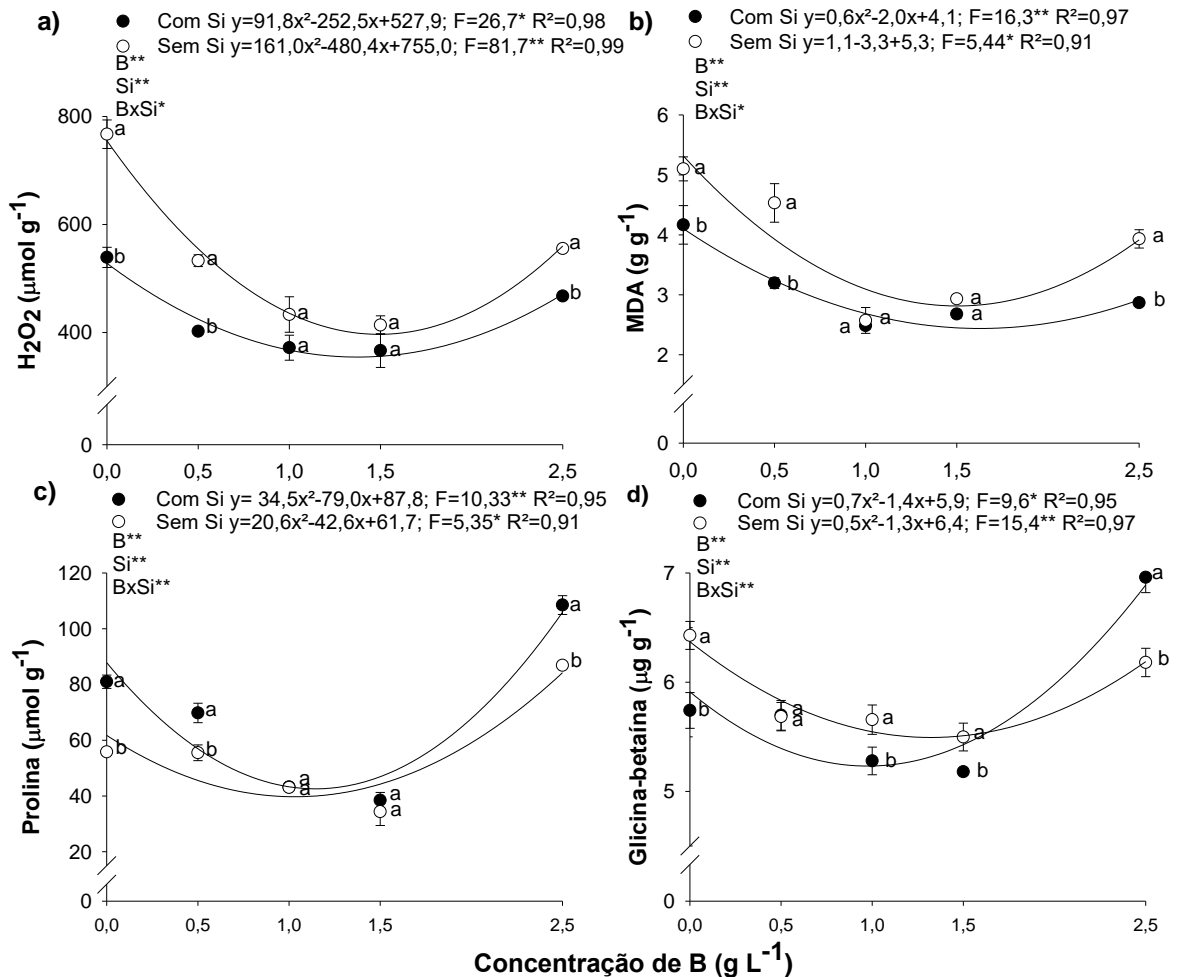


Figura 6. Produção de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) (a), malondialdeído (MDA) (b), prolina (c) e glicino-betaína (d) em folhas de algodão cultivadas sob deficiência de B, em função de diferentes concentrações de boro (B) e silício (Si) aplicados via foliar.

O teor de H₂O₂ decresceu em função do aumento das concentrações de B aplicado via foliar, com ponto mínimo nas concentrações de 1,37 e 1,49 g L⁻¹ de B na presença e na ausência de Si, respectivamente, para H₂O₂ (Figura 6a); e nas concentrações de 1,66 e 1,50 g L⁻¹ de B na presença e na ausência de Si, respectivamente, para MDA (Figura 6b). A deficiência de B apresentou maior destaque na produção de H₂O₂ (Figura 6a) e MDA (Figura 6b), em comparação à

toxicidade do micronutriente. No tratamento controle de B (0,0 g L⁻¹ de B), foi observado produção de 539,1 e 767,3 $\mu\text{mol g}^{-1}$ de H₂O₂, para presença e ausência de Si, respectivamente. Estes valores representam aumento de 15% e 38% no teor de H₂O₂ produzido pelas plantas cultivadas sob toxicidade de B (2,5 g L⁻¹), as quais apresentaram valor de 467,3 e 555,4 $\mu\text{mol g}^{-1}$, para presença e ausência de Si, respectivamente (Figura 6a). No mesmo tratamento (0,0 g L⁻¹ de B) houve destaque, tendo alta produção de MDA iguais a 4,2 e 5,1 g g⁻¹, representando incremento de 50 e 30%, em relação ao tratamento 2,5 g L⁻¹ de B, o qual produziu 2,8 e 3,9 g g⁻¹ de MDA, para presença e ausência de Si, respectivamente (Figura 6b).

A produção de prolina (Figura 6c) e GB (Figura 6d) decresceu com ajuste quadrático em função do aumento na concentração de B. Os pontos mínimos, para prolina, foram observados com o fornecimento de 1,14 e 1,03 g L⁻¹ de B, com produção de 42,6 e 39,7 $\mu\text{mol g}^{-1}$ de prolina, para presença e ausência de Si, respectivamente; os pontos mínimos, para glicina-betaína, foram observados com o fornecimento de 1,0 e 1,3 g L⁻¹ de B, com produção de 5,2 e 5,5 g g⁻¹, para presença e ausência de Si, respectivamente.

A prolina possui importante função na tolerância ao estresse oxidativo, por incrementar o potencial redox, vital para a defesa antioxidante das plantas, atuando na reposição do suprimento de NADP⁺ (Hassine et al., 2008). Durante a síntese de prolina é gerado NADP⁺ e a sua oxidação resulta na produção de NADPH, deste modo, ela atua como agente tamponante do potencial redox no interior celular (Hossain et al., 2014), se ligando e neutralizando, facilmente, as ERO (Liang et al., 2013). Nesse contínuo, plantas sob condições estressantes apresentam aumento no conteúdo de prolina, pois, nessas condições, ocorre a superprodução de compostos com baixo peso molecular e altamente solúveis, como solutos orgânicos compatíveis (Pei et al., 2010).

A GB, por sua vez, contribui para manutenção da integridade estrutural e funcional celular possível, devido à sua interação com os domínios hidrofílicos e hidrofóbicos de complexos proteicos e membranosos (Sun et al., 2020). Assim, a GB reduz os níveis de ERO, auxiliando na sua homeostase (Badran et al., 2015) e induzindo a expressão gênica relacionadas ao mecanismo de defesa do estresse,

por meio da via octadecanoide (Karabudak et al., 2014). Os mecanismos de ação da GB em plantas de algodão são pouco conhecidos, no entanto, Hamani et al., (2020) verificaram, nesta espécie cultivada sob estresse (salino) que, a aplicação exógena de GB diminui a produção de MDA e auxilia na ativação de enzimas antioxidantes.

Outrossim, a produção desses compostos antioxidantes não enzimáticos foi maior nas plantas sob toxicidade, sendo observado teor de prolina igual a 108,5 e 86,89 g g⁻¹, o que representa incremento de 34 e 56% no teor deste composto em relação às plantas sob deficiência, que foi 81,0 e 55,8 g g⁻¹, para presença e ausência de Si, respectivamente. A produção de glicina-betaína, também foi maior nas plantas sob toxicidade, sobretudo, na presença de Si, com produção de 6,96 g g⁻¹ de glicina-betaína, um aumento de 21% em relação às plantas sob deficiência, com produção de 5,74 g g⁻¹ de glicina-betaína. Na ausência do elemento benéfico, o incremento foi de 4% nas plantas sob toxicidade (6,42 g g⁻¹) em comparação às plantas sob deficiência (6,18 g g⁻¹).

A adição de Si à calda boratada reduziu a produção de H₂O₂ (Figura 6a) e MDA (Figura 6b) nas plantas sob deficiência (0,0 e 0,5 g L⁻¹ de B) e toxicidade (2,5 g L⁻¹ g L⁻¹ de B). O elemento benéfico se destacou em reduzir a produção de H₂O₂, principalmente, nas plantas sob deficiência de B, com produção de 539,1 e 402,2 μmol g⁻¹ para 0,0 e 0,5 g L⁻¹ de B, respectivamente. Estes valores são 29 e 24% menores comparados à produção de H₂O₂ na ausência do elemento benéfico, que foi de 767,3 e 532,9 μmol g⁻¹ para 0,0 e 0,5 g L⁻¹ de B, respectivamente. O elemento benéfico, também se destacou em incrementar a produção de prolina (Figura 5c) e glicina-betaína (Figura 6d), precipuamente, nas plantas sob toxicidade de B (2,5 g L⁻¹ de B).

Os mecanismos do Si na biossíntese desses compostos antioxidantes não-enzimáticos, ainda não são claros na literatura. Estudos indicam que, a aplicação do elemento benéfico reduz a produção de prolina (Detmann et al., 2012; Singh e Roychoudhury, 2020; Teixeira et al., 2020) e de GB (Singh e Roychoudhury, 2020), sendo isto indicativo de redução na injúria celular ocasionada pelo efeito do Si, como agente protetor e em ativar mecanismos de defesa contra danos celulares. Por outro lado, outros estudos indicam que, a aplicação de Si ativa os mecanismos

de defesa enzimáticos (Moldes *et al.*, 2013), especialmente, os não enzimáticos (Carneiro-Carvalho *et al.*, 2020) dado o incremento na produção de prolina e GB resultado da função ativadora/protetora do Si, conforme visto no presente experimento.

3.4 Produção de massa seca

A produção de massa seca de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B foi incrementada até aplicação de 1,2 e 1,1 g L⁻¹ de B, com produção máxima de 6,1 e 5,4 g, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Figura 7a).

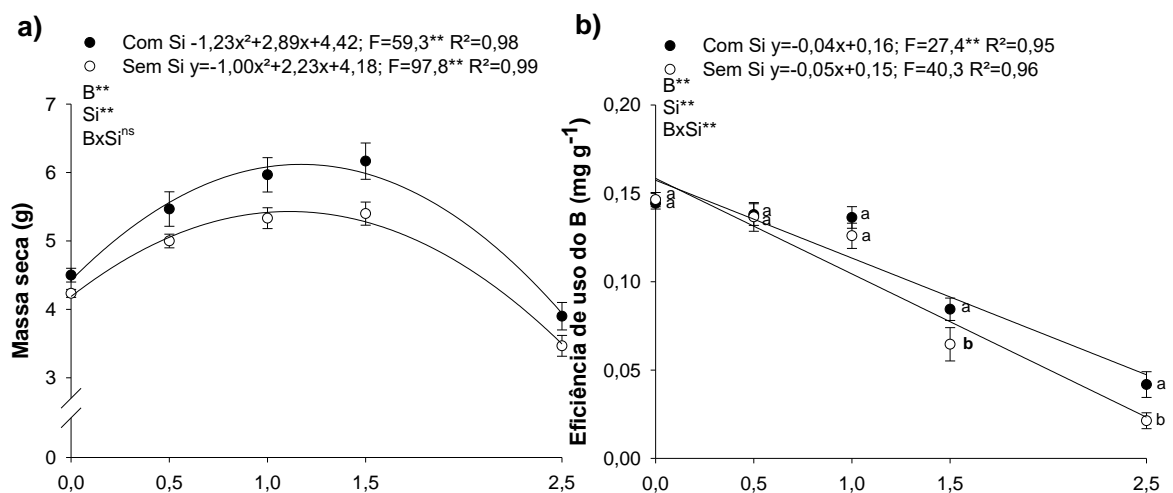


Figura 7. Massa seca da parte aérea (a) e eficiência de uso do boro (b), em plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B, em função de diferentes concentrações de boro (B) e silício (Si) aplicados via foliar.

Os teores críticos do B na calda para causar a deficiência e a toxicidade do nutriente no algodoeiro, com redução de 10% no total de massa seca produzida, foram 0,5 e 1,9 g L⁻¹ de B, respectivamente, para presença de Si; e em 0,4 e 1,9 g L⁻¹ de B para ausência de Si na calda. A presença de Si na calda boratada incrementou a produção de massa seca em todas as concentrações de B estudadas (Figura 7a).

A eficiência de uso de B na parte aérea, na ausência ou na presença de Si (Figura 7b), reduziu linearmente com o aumento na concentração de B aplicada. A presença do elemento benéfico na calda boratada incrementou a eficiência de uso do B nas concentrações de 1,5 e 2,5 g L⁻¹.

A diagnose visual das plantas com todos os tratamentos em relação às plantas controle (sem deficiência de B) identificou como principal sintoma a ocorrência generalizada de folhas pequenas. Foi observado, também, margens necróticas nas folhas das plantas sob toxicidade de B ($2,5 \text{ g L}^{-1}$ g de B).

Neste trabalho, os resultados evidenciam que o Si modula o sistema antioxidante não enzimático, atenuando o estresse nutricional e favorecendo o incremento na produção de massa seca das plantas de algodão sob deficiência ou toxicidade de B (Figura 7a). Portanto, é possível que esse papel antioxidante do Si poderia explicar os benefícios desse elemento em plantas de algodão sob deficiência do micronutriente supramencionado, vistos por Souza Júnior et al. (2019) e por Barros et al. (2019), que atribuíram este resultado ao aumento do teor de clorofila e da eficiência fotossintética.

É conhecido que, a toxicidade de um elemento químico promovido pela aplicação foliar é relativamente rápida, tendo poucas estratégias para reverter os danos foliares. Os resultados evidenciaram que é possível atenuar esse dano foliar com acréscimo do Si na calda, durante a pulverização foliar, indicando a rapidez e o elevado potencial do elemento em diminuir estresse oxidativo. Isso deve ter favorecido o metabolismo da planta e, conseqüentemente, promoveu incremento da eficiência de uso do B nas maiores concentrações do elemento aplicado via foliar (Figura 7c).

Os resultados permitem aceitar a hipótese que a adição de Si à calda boratada atenua o estresse oxidativo e incrementa o desenvolvimento das plantas, atenuando os danos da desordem nutricional de boro, por carência ou excesso do micronutriente, , por modular o sistema de defesa antioxidante não enzimático.

4. CONCLUSÃO

O fornecimento foliar de B, até a concentração de $1,1 \text{ g L}^{-1}$ na ausência de Si, ou $1,2 \text{ g L}^{-1}$, na presença de Si ($1,0 \text{ g L}^{-1}$) proporcionam máximo acúmulo de massa seca.

O uso de Si na calda de aplicação do B indica ser eficiente em atenuar os efeitos deletérios da deficiência do micronutriente e o uso da concentração de $2,5$

g L⁻¹ de B induz grave toxicidade na planta, mas não é eficaz na solução da deficiência e toxicidade do micronutriente.

A adição de Si à calda boratada é importante para pulverização foliar do algodoeiro por incrementar a produção de prolina e de glicina-betaína, reduzir a produção de H₂O₂ e MDA, e, conseqüentemente, reduzindo danos oxidativos nas plantas sob deficiência ou toxicidade de B.

5. REFERÊNCIAS

Ahmad R, Ali S, Abid M, Rizwan M, Ali B, Tanveer A, Ahmad I, Azam M, Ghani MA (2020) Glycinebetaine alleviates the chromium toxicity in Brassica oleracea L. by suppressing oxidative stress and modulating the plant morphology and photosynthetic attributes. **Environmental Science Pollution Research** 27:1101–1111.

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.

Atique-Ur-Rehman QR, Hussain A, Sardar H, Sarwar N, Javeed HMR, Maqbool A, Hussain M (2020) Soil applied boron (B) improves growth, yield and fiber quality traits of cotton grown on calcareous saline soil. **Plos One** 15:e0231805.

Badran EG, Abogadallah GM, Nada RM, Nemat Alla MM (2015) Role of glycine in improving the ionic and ROS homeostasis during NaCl stress in wheat. **Protoplasma** 252:835–844.

Barros TC, Prado RM, Roque CG, Arf MV, Vilela RG (2019) Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition** 42:458–465.

Bataglia OC, Teixeira JP, Furlani PR, Furlani AM, Gallo JR (1978) Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 31p.

Bates LS, Waldren RP, Teare ID (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant Soil** 39:205–207.

Bharwana AS, Ali S, Farooq MA, Abbas F (2013) Alleviation of lead toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes suppressed lead uptake and oxidative stress in cotton. **Journal of Bioremediation and Biodegradation** 4:e1000187.

Brdar-Jokanović M (2020) Boron toxicity and deficiency in agricultural plants. **International Journal of Molecular Sciences** 21:e1424.

Carneiro-Carvalho A, Aires A, Anjos R, Martins L, Pinto T, Peixoto F, Gomes-Laranjo J (2020) The role of silicon fertilization in the synthesis of phenolic compounds on chestnut plants infected with *P. cinnamomi* and *C. parasitica*. **Journal of Plant Diseases and Protection** 127:211–227.

Detmann KC, Araújo WL, Martins SCV, Sanglard LMVP, Reis J V., Detmann E, Rodrigues FÁ, Nunes-Nesi A, Fernie AR, Damatta FM (2012) Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist** 196:752–762.

Farooq MA, Ali S, Hameed A, Ishaque W, Mahmood K, Iqbal Z (2013) Alleviation of cadmium toxicity by silicon is related to elevated photosynthesis, antioxidant enzymes; suppressed cadmium uptake and oxidative stress in cotton. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 96:242–249.

Ferreira DF (2014) Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciencia e Agrotecnologia** 38:109–112.

Fryzova R, Pohanka M, Martinkova P, Cihlarova H, Brtnicky M, Hladky J, Kynicky J (2018) Oxidative stress and heavy metals in plants. In.: Voogt P (Ed) **Reviews of environmental contamination and toxicology**. Nova York: Springer, p. 129–156.

Görmüs Ö (2005) Interactive effect of nitrogen and boron on cotton yield and fiber quality. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry** 29:51–59.

Gratão PL, Polle A, Lea PJ (2005) Azevedo, R. A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology** 32:481-494.

Grieve CM, Grattan SR (1983) Rapid assay for determination of water soluble quaternary ammonium compounds. **Plant Soil** 70:303–307.

Hamani AKM, Wang G, Soothar MK, Shen X, Gao Y, Qiu R, Mehmood F (2020) Responses of leaf gas exchange attributes, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in NaCl-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings to exogenous glycine betaine and salicylic acid. **BMC Plant Biology** 20:e434.

Hassine AB, Ghanem ME, Bouzid S, Lutts S (2008) An inland and a coastal population of the Mediterranean xero-halophyte species *Atriplex halimus* L. differ in their ability to accumulate proline and glycinebetaine in response to salinity and water stress. **Journal of Experimental Botany** 59:1315–1326.

Hoagland DR, Arnon DI (1950) The water-culture method for growing plants without soil. Los Angeles: California agricultural experiment station 347p.

Hossain MA,, Hoque MA, Burritt DJ, Fujita M (2014) Proline protects plants against abiotic oxidative stress: Biochemical and molecular mechanisms. In.: Ahmad P (Ed) **Oxidative Damage to Plants: Antioxidant Networks and Signaling**. Nova York: Elsevier, p. 477–522.

Hua T, Zhang R, Sun H, Liu C (2020) Alleviation of boron toxicity in plants: Mechanisms and approaches. **Critical Reviews in Environmental Science and Tecnology** 27:1-41.

Karabudak T, Bor M, Özdemir F, Türkan I (2014) Glycine betaine protects tomato (*Solanum lycopersicum*) plants at low temperature by inducing fatty acid desaturase7 and lipoxygenase gene expression. **Molecular Biology Reports** 41:1401–1410.

Khan MA, Wahid A, Ahmad M, Tahir MT, Ahmed M, Ahmad S, Hasanuzzaman M (2020) World cotton production and consumption: An overview. In: Ahmad S, Hasanuzzaman M (Eds.) **Cotton production and uses**. Singapura: Springer, p. 1–7.

Kim Y-H, Khan AL, Waqas M, Lee I-J (2017) Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers Plant Science** 8:e510.

Kondörfer GH, Pereira HS, Nola A (2004) Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 18p.

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

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

Liang Y, Sun W, Zhu YG, Christie P (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution** 147:422–428.

Liang X, Zhang L, Natarajan SK, Becker DF (2013) Proline mechanisms of stress survival. **Antioxidants and Redox Signaling** 19:998–1011.

Moldes CA, Lima Filho OF, Camiña JM, Kiriachek SG, Molas ML, Tsai SM (2013) Assessment of the effect of silicon on antioxidant enzymes in cotton plants by multivariate analysis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 61:11243–11249.

Moraes DHM, Mesquita M, Bueno AM, Flores RA, Oliveira HFE, Lima FSR, Prado RM, Battisti R (2020) Combined effects of induced water deficit and foliar application of silicon on the gas exchange of tomatoes for processing. **Agronomy** 10:e1715.

Oliveira KR, Souza Junior JP, Bennett SJ, Checchio MV, Alves RC, Felisberto G, Prado RM, Gratão PL (2020) Exogenous silicon and salicylic acid applications improve tolerance to boron toxicity in field pea cultivars by intensifying antioxidant defence systems. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 201:e110778.

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.

Peixoto MM, Flores RA, Couto CA, Pacheco HDN, Prado RM, Souza Junior JP, Castro Netto JA, Ribeiro DG (2020) Silicon application increases biomass yield in sunflower by improving the photosynthesizing leaf area. **Silicon** 10:1–6.

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

Rady MM, Elrys AS, Abo El-Maati MF, Desoky ESM (2019) Interplaying roles of silicon and proline effectively improve salt and cadmium stress tolerance in *Phaseolus vulgaris* plant. **Plant Physiology and Biochemistry** 139:558–568.

Rahman MT, Haque MM, Mortuza MGG, Hossain MS, Chowdhury MSN (2019) Altering growth characters and seed cotton yield under foliar application of boron. **International Journal of Plant & Soil Science** 27:1–5.

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

Singh A, Roychoudhury A (2020) Silicon-regulated antioxidant and osmolyte defense and methylglyoxal detoxification functions co-ordinately in attenuating fluoride toxicity and conferring protection to rice seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry** 154:758–769.

Singh S, Singh VP, Prasad SM, Sharma S, Ramawat N, Dubey NK, Tripathi DK, Chauhan DK (2019) Interactive effect of silicon (Si) and salicylic acid (SA) in maize seedlings and their mechanisms of cadmium (Cd) Toxicity Alleviation. **Journal of Plant Growth Regulation** 38:1587–1597.

Song B, Hao X, Wang X, Yang S, Dong Y, Ding Y, Wang Q, Wang X, Zhou J (2019) Boron stress inhibits beet (*Beta vulgaris* L.) growth through influencing endogenous hormones and oxidative stress response. **Soil Science and Plant Nutrition** 65:346–352.

Souza Junior JP, Prado RM, Sarah MMS, Felisberto G (2019) Silicon mitigates boron deficiency and toxicity in cotton cultivated in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 182:805–814.

Souza Junior JP, Prado RM, Soares MB, Silva JLF, Guedes VHF, Sarah MMS, Cazetta JO (2020) Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:95-103.

Sun H, Luo M, Zhou X, Zhou Q, Sun Y, Ge W, Wei B, Cheng S, Ji S (2020) Exogenous glycine betaine treatment alleviates low temperature-induced pericarp browning of 'Nanguo' pears by regulating antioxidant enzymes and proline metabolism. **Food Chemistry** 306:e125626.

Teixeira GCM, Mello Prado R, Rocha AMS, Santos LCN, 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.

Wahid MA, Saleem M, Irshad S, Khan S, Cheema MA, Saleem MF, Tung AS (2020) Foliar feeding of boron improves the productivity of cotton cultivars with enhanced boll retention percentage. **Journal of Plant Nutrition** 43:2411–2424.

Zhuravlev LT (2000) The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 173:1–38.

CAPÍTULO 3 – Adição de Si à calda boratada para aplicação foliar incrementa a eficiência de uso de boro pela flor e aumenta a produção de grãos de pólen

RESUMO

Nas plantas de algodão o boro (B), tem destaque na fase reprodutiva. Nesta fase, o silício (Si) pode contribuir para melhorar o uso do B pela planta e incrementar a produção de grãos de pólen, mas faltam pesquisas em plantas de algodão. Foi desenvolvido essa pesquisa objetivando avaliar se o Si na aplicação foliar de B propicia maior eficiência de uso do micronutriente e produção de grãos de pólen de plantas de algodão '954 GLT' cultivadas sob deficiência de B. O experimento foi realizado em casa de vegetação em cultivo sem solo. Foram avaliadas cinco concentrações de B via foliar (0,0; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,5 g L⁻¹), na ausência e na presença de Si (1,00 g L⁻¹), dispostos em blocos inteiramente casualizados, em esquema fatorial 5x2+1, com quatro repetições. O tratamento adicional corresponde a suficiência de B no meio de cultivo. A calda foi pulverizada na parte aérea das plantas em estágio B1, e repetida por quatro vezes a cada quatro dias. Três semanas após as aplicações foram coletadas flores em antese para avaliações biológicas. O algodoeiro é uma cultura responsiva a aplicação foliar de B na fase reprodutiva por aumentar o acúmulo do micronutriente na flor, a massa seca da flor e a produção de grãos de pólen. A presença de Si na calda contribui para incrementar todas as características avaliadas, com destaque para a eficiência de uso de boro pela flor e para a produção de grãos de pólen, nas concentrações de 1,5 g L⁻¹ de B e 1,0 g L⁻¹ Si.

Palavras-chave: Estádio reprodutivo. Nutrição boratada. Desenvolvimento reprodutivo.

1. INTRODUÇÃO

O boro (B) é o micronutriente mais limitante durante o estágio reprodutivo para a cultura do algodão. O benefício deste nutriente em destaque está em seu papel fundamental no transporte de fotoassimilados das folhas para as flores (Bogiani et al., 2013) e na reprodução das plantas (Leonard et al., 2014). Durante o estágio reprodutivo, as plantas apresentam maior exigência nutricional deste micronutriente, comparado ao estágio vegetativo (Prado, 2021). Nesta fase, a deficiência de B diminui o transporte de carboidratos para as flores (Bogiani et al., 2013), e pode promover danos na formação da inflorescência, diminuindo a produção e a viabilidade dos grãos de pólen (Oosterhuis e Zhao, 2001), e, conseqüentemente a produtividade do algodoeiro.

Alguns estudos pontuais indicam uma possível relação benéfica entre o B e o silício (Si), pois foi constatado resposta do algodoeiro à aplicação foliar de Si em solos com baixo teor do micronutriente, favorecendo a produção de massa seca das plantas cultivadas em condição controlada (Souza Junior et al., 2019, 2020) e da sua produtividade em condição de campo (Barros et al., 2019). Em adição, o Si pode incrementar a absorção do micronutriente (Souza Junior et al., 2019) e favorecer o metabolismo vegetal (Souza Junior et al., 2020), aumentando a produção de massa seca das plantas podendo contribuir para aumentar a eficiência de uso do micronutriente. No entanto, os autores não avaliaram a possível interação destes elementos na fase reprodutiva do algodoeiro, fato que poderia explicar seus benefícios na produtividade da cultura.

Um estudo nas estruturas reprodutivas de *Lychnis alba*, indicam que o Si pode contribuir na formação de componentes presentes na estrutura da parede celular dos grãos de pólen (Crang e May, 1974). Durante a formação dos grãos de pólen são utilizadas pectinas para formação de suas paredes (Golaszweska e Bednarska, 1999; Aouali et al., 2001;), e, em caso de deficiência de B, a rigidez da esporoderme é comprometida, diminuindo a produção dos grãos de pólen (Nyomora et al., 2000; Iwai et al., 2006;). O Si, por sua vez, pode formar complexos com pectinas (Boylston et al., 1990) favorecendo a resistência física da parede celular (Kido et al., 2015). Posto isto, pode-se inferir que o benefício do Si por compor componentes da

parede celular dos grãos de pólen pode diminuir a exigência de B na flor, se comprovar o aumento da eficiência nutricional do micronutriente neste órgão. Isso é importante, pois o teor de B do grão de pólen é relativamente alto atingindo 20-30 ppm (Polster et al., 1978).

Em estudo clássico sobre a relação B e Si no desenvolvimento floral em *Lilium longiflorum* (Thunb) foi observado que o Si possui função sinérgica ao B, estimulando a produção e a germinação dos grãos de pólen em um teste laboratorial *in vivo* (Polster et al., 1978). No entanto, há dúvida se essa interação possa ocorrer em situação natural na flor do algodoeiro que recebeu pulverização destes dois elementos.

Nesse cenário é pertinente verificar a hipótese se a pulverização foliar de Si adicionado a calda boratada no algodoeiro é suficiente para aumentar a eficiência de uso do B na flor e se isso favorece o desenvolvimento reprodutivo a partir do aumento da produção e da viabilidade de grãos de pólen (Figura 1). Entretanto, para testar essa hipótese a compatibilidade química entre o Si e o B na calda de pulverização deve ser considerada. Isso é importante porque Si em solução pode reagir com outro elemento induzindo a sua polimerização, inviabilizando a absorção foliar da mistura B+Si.

Deste modo, foi realizada essa pesquisa objetivando-se avaliar se a aplicação foliar de B, na ausência e presença de Si, teria efeito na eficiência de uso do micronutriente e no acúmulo de carboidrato na flor e na produção e viabilidade de grãos de pólen de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B

2.2 Delineamento experimental, tratamentos e aplicação foliar

O experimento foi delineado em blocos inteiramente casualizados em esquema fatorial $5 \times 2 + 1$ com quatro repetições, e as aplicações foram realizadas conforme descrito no capítulo 2 (item 2.2).

2.4 Coleta das flores e avaliação da quantidade de grãos de pólen

Três semanas após a quarta aplicação foliar, foram coletadas quatro flores em antese para avaliação da produção de grãos de pólen.

Após as coletas das flores foi realizado coleta dos grãos de pólen pelo método de varredura, sendo montada três lâminas para cada flor.

A quantidade de grãos de pólen, por sua vez, foi contabilizada a partir da contagem de 30 campos de 1 mm^2 por lâmina em microscópio de luz com lente objetiva de 10X, totalizando 30 mm^2 por flor.

2.5 Massa seca, teor e acúmulo de B e Si, teor de carboidratos e eficiência de uso do B nas flores

Após coleta de grãos de pólen, as flores foram lavadas com água, solução detergente (0,1%), solução HCl (0,1%) e água deionizada e então acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar a $65 \pm 5^\circ\text{C}$ até obtenção de massa constante e determinou-se a massa seca.

Após pesagem as flores foram maceradas em cadinho de forma manual para realizar análise química. O teor de B foi determinado a partir da digestão das amostras via seca, por queima em mufla a 400°C seguida por reação colorimétrica com azometina-H e determinação por leitura em espectrofotômetro colorimétrico (Bataglia et al., 1983). O teor de Si foi determinado a partir da digestão alcalina do material vegetal com H_2O_2 e NaOH em estufa a 90°C durante 3 h (Kraska e Breitenbeck, 2010) seguida por reação colorimétrica com molibdato de amônia em meio ácido (ácido oxálico e ácido clorídrico), sendo a determinação realizada por leitura em espectrofotômetro colorimétrico (Kondörfer et al., 2004).

A determinação do teor de carboidrato das flores foi realizada de acordo com metodologia descrita por Dubois et al. (1956). Foram pesadas 50 mg de massa de matéria seca de amostras moídas e secas, sendo então colocadas em tubos de ensaio de 15 mL, homogêneos com 5 mL de água destilada e colocados em banho-maria por 30 min a 100°C. Em seguida, realizou-se a extração das amostras a partir da centrifugação em centrífuga de bancada (1000 rpm) durante 10 min. Posteriormente foi retirada uma alíquota de 100 µL do sobrenadante (realizando o teste de diluição) junto com 400 µL de água destilada em tubos de ensaio e sob agitação utilizando aparelho vórtex. Depois foram adicionados 0,5 mL de fenol 5% e agitando novamente no aparelho vórtex e adicionado 2,5 mL de H₂SO₄ concentrado. Após agitação dos tubos foram realizadas leituras no espectrofotômetro a 490 nm, tendo como o branco a utilização de água destilada (em substituição ao extrato) + reagentes, que foram colocados nas seguintes proporções: 0,5 mL de água destilada + 0,5 mL de fenol 5% + 2,5 mL de H₂SO₄. Para o cálculo das concentrações de carboidratos solúveis totais foi utilizada curva padrão de glicose e os resultados serão expressos em g MS⁻¹.

O acúmulo de B e de Si foi calculado como sendo o produto entre o teor de B ou Si e a massa seca da parte aérea. Em adição, foi calculado a eficiência de uso de B a partir da razão entre o quadrado da massa seca da parte aérea e o conteúdo de B na parte aérea, conforme descrito por Siddiqi e Glass (1981).

2.6 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (Teste F). Quando significativos, as médias foram comparadas a partir do teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas com o Sisvar[®] (Ferreira, 2014) e os gráficos com utilização do Sigmaplot[®].

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 Acúmulo de B e Si, teor de carboidratos, produção de massa seca e eficiência de uso de boro nas flores de algodoeiro

A aplicação foliar de B foi eficiente em incrementar o acúmulo do micronutriente nas flores de algodoeiro cultivado sob deficiência deste nutriente, atingindo máximo de 268 e 245 μg de B por flor na concentração de 1,91 e 1,84 g L^{-1} de B, para presença e ausência de Si, respectivamente. A pulverização foliar com adição de Si na calda boratada incrementou o acúmulo de B na flor da planta de algodão nas concentrações de 0,5; 1,0 e 2,5 g L^{-1} de B (Figura 2a). A presença do elemento benéfico na calda boratada para aplicação foliar também foi eficiente em fornecer Si para a flor da planta de algodão, incrementando o acúmulo deste elemento, com ajuste linear, atingindo 44 μg de Si por flor na concentração de 2,5 g L^{-1} de B (Figura 2b).

O aumento na concentração de B aplicado via foliar incrementou o teor de carboidrato nas flores de algodão, com ponto máximo observado em 1,55 e 1,41 g L^{-1} de B, para presença e ausência de Si, respectivamente. A adição de Si à calda boratada incrementou o teor de carboidratos nas flores em todas as concentrações estudadas (Figura 2c).

A pulverização foliar de B incrementou a produção de massa seca da flor atingindo máximo de 1,62 e 1,45 g nas concentrações de 1,45 e 1,5 g L^{-1} de B, para presença e ausência de Si, respectivamente. Esta variável também foi incrementada pela adição de Si à calda boratada especialmente quando empregada concentração baixa de B (0,5 g L^{-1} de B) ou alta (2,5 g L^{-1} de B) do micronutriente (Figura 2d).

Houve diminuição da eficiência de uso de B da flor (Figura 3e) com o aumento da concentração de B aplicada via foliar, com mínimo de 0,0010 e 0,0006 mg g^{-1} , para presença e ausência de Si, respectivamente na maior concentração de B aplicada (2,5 g L^{-1}).

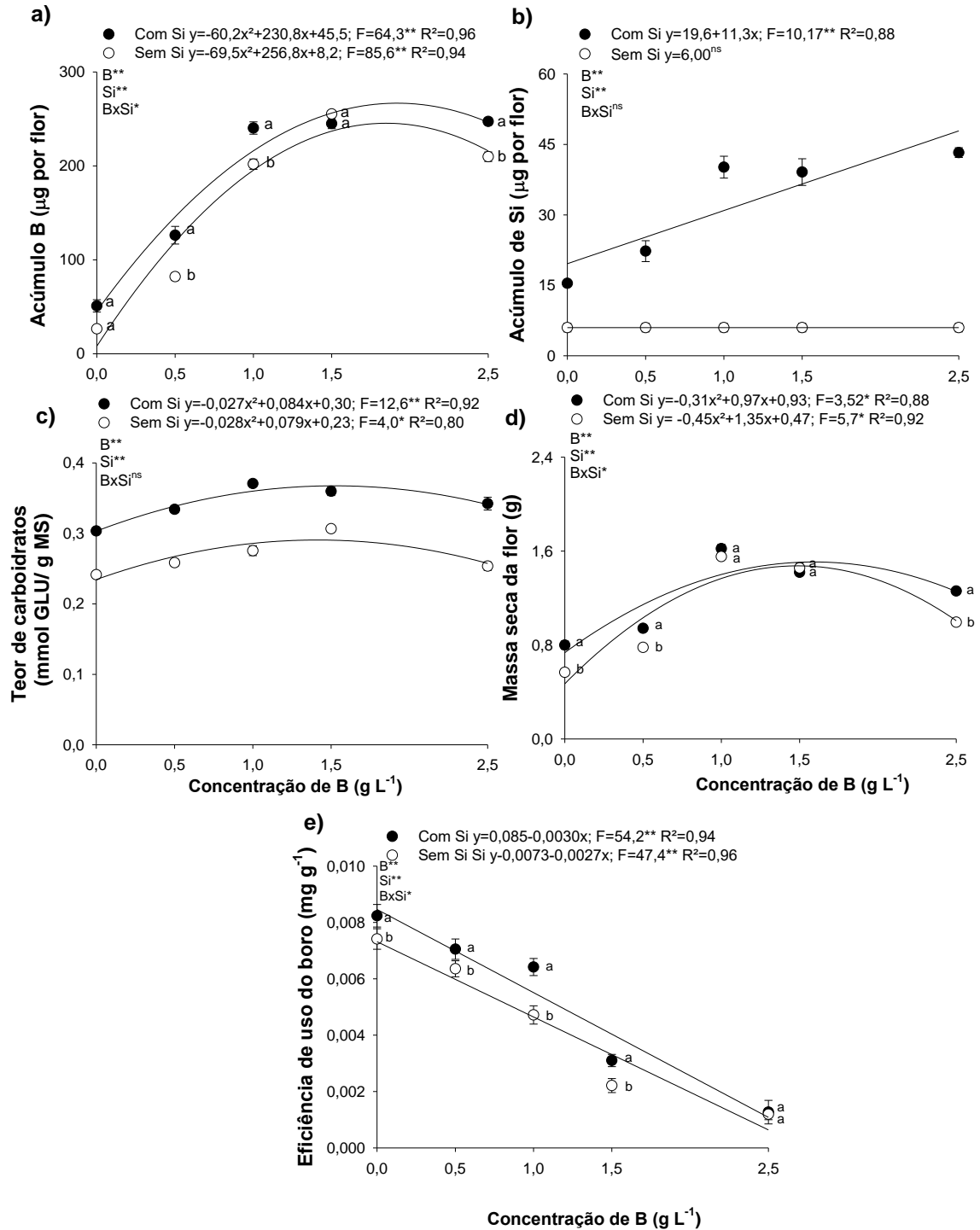


Figura 2. Acúmulo de boro (a) e de silício (Si); teor de carboidratos (c), massa seca (d) e eficiência de uso do boro (e) nas flores de plantas de algodão cultivada sob deficiência de B em função de aplicações foliares de boro (B) na ausência e presença de silício (Si).

A baixa polimerização do Si presente na calda boratada ($2,50 \text{ g L}^{-1}$ de B) pode ser confirmada neste trabalho pela eficiência da aplicação foliar, pois ficou

claro o incremento do teor foliar do micronutriente (Figura 3a) e do elemento benéfico (Figura 2b) nas flores de algodão. Em adição, o sorbitol tem outro efeito no processo de absorção de Si na folha ou na flor pois ele diminui o ponto de deliquescência da gota depositada na superfície do tecido vegetal diminuindo a velocidade de evaporação da água (Kubicki e Heaney, 2003), favorecendo a sua absorção (Prado, 2021).

Ficou evidenciado que a absorção do B pela flor especialmente em associação do Si favoreceu a alta produção de massa seca deste sistema (Figura 2d) do algodoeiro e incrementou o teor de carboidrato (Figura 2c). Portanto, a pulverização foliar com calda com Si se destacou seja na ausência de B ou com concentração baixa de B ($0,5 \text{ g L}^{-1}$), pois foi efetiva e suficiente para beneficiar a formação da flor do algodoeiro com deficiência deste micronutriente. Os relatos sobre o melhor desenvolvimento da flor está restrito ao efeito isolado do Si em *Zinnia elegans* e *Gerbera jamesonii* (Kamenidou *et al.*, 2009, 2010). Pode-se inferir então, que aumento da produtividade em função da pulverização foliar do Si na fase reprodutiva do algodoeiro deficiente de B (Barros *et al.*, 2019) e também em outras culturas pode estar relacionado ao benefício do elemento na formação da flor da cultura mas é um fato pouco abordado pelos pesquisadores que trabalham com o Si.

Em adição, o Si absorvido pela planta pode se ligar com compostos orgânicos (Neu *et al.*, 2017; Klotzbücher *et al.*, 2018; Mantovani *et al.*, 2018; Frazão *et al.*, 2020) especialmente com componentes da parede celular como a hemicelulose (He *et al.*, 2015). Portanto, em condição de deficiência de B o fornecimento de Si contribui formando ligação mista com (1;3,1;4)- β -D-glucano aumentando a resistência física da parede celular (Kido *et al.*, 2015). Este efeito do Si poderia gerar estratégia “energia a baixo custo” pois a sua ligação com compostos orgânicos da parede celular conforme dito anteriormente teria baixo custo energético para a planta e com isso a planta pouparia energia pois ela induz diminuição da síntese de compostos estruturais como lignina que tem alta demanda de energia para sua síntese (Raven, 1983; Neu *et al.*, 2017). Deste modo, revelamos que a presença do elemento benéfico na calda com B favoreceu a produção de massa seca da flor (Figura 3d) devido ao incremento da eficiência de

uso do micronutriente neste órgão (Figura 2e) ao favorecer o metabolismo vegetal especialmente processos ligados à parede celular nos tecidos da flor.

3.2 Produção de grãos de pólen nas flores de algodoeiro

A produção de grãos de pólen da flor foi incrementada com pulverização foliar até a concentração de 1,32 e 1,42 g L⁻¹ de B, atingindo produção máxima de 818 e 760 grãos de pólen por 30 mm⁻², na presença e na ausência de Si, respectivamente. A presença de Si na calda empregada para a pulverização incrementou a produção de grãos de pólen da flor nas concentrações de 0,0; 0,5 e 2,5 g L⁻¹ de B (Figura 3).

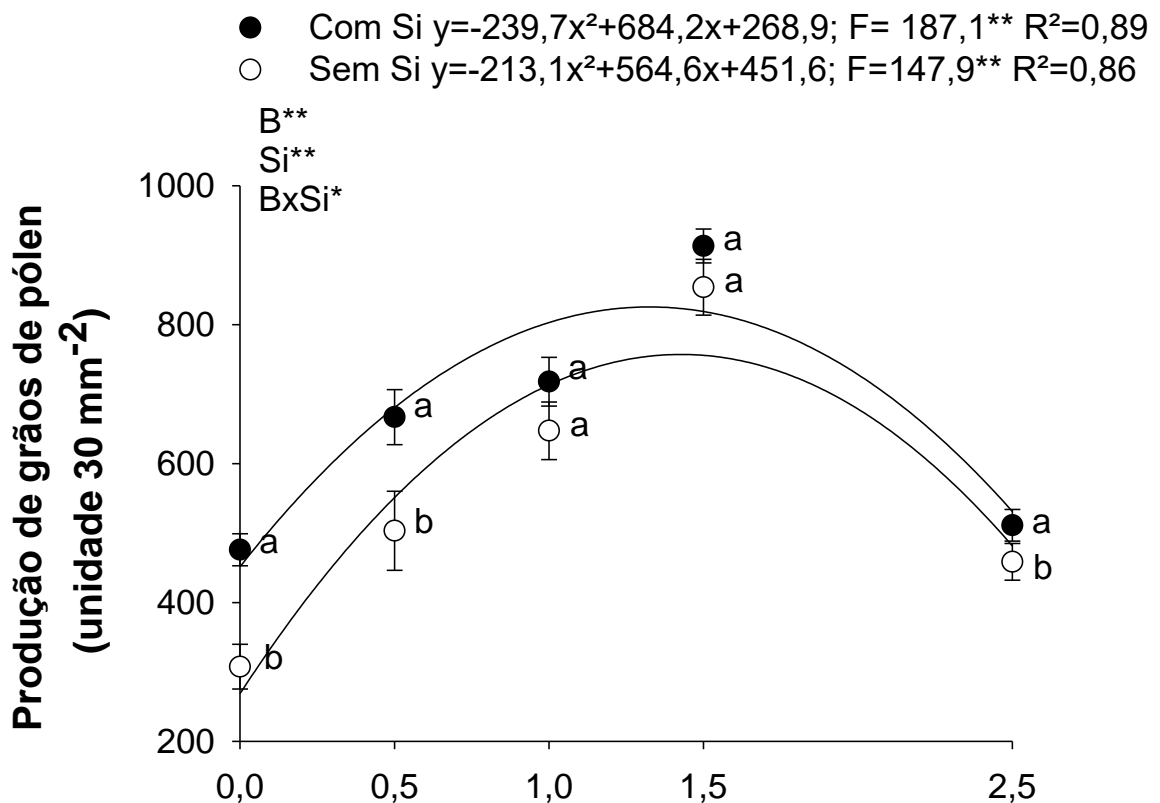


Figura 3. Produção de grãos de pólen nas flores de grãos de pólen de plantas de algodão cultivada sob deficiência de B em função de aplicações foliares de boro (B) na ausência e presença de silício (Si).

O benefício do B na floração das culturas é bem relatado (Archana, 2021; Pereira et al., 2021) dada sua importância na formação dos grãos de pólen. A alta viabilidade dos grãos de pólen é importante para garantir o crescimento do tubo

polínico e fertilizar as células gaméticas do saco embrionário (Dafni, 1992) aumentando a florada. Os resultados possibilitam observar que é possível aumentar a quantidade de grãos de pólen com incremento das concentrações de B pulverizada nas plantas de algodão especialmente com adição de Si na calda. Isso é um indicativo que o Si pode diminuir a necessidade de B para a formação dos grãos de pólen e da própria flor pois segundo Rerkasem *et al.* (2020) é um sistema exigente pelo micronutriente.

Em adição, esta pesquisa comprovou a sinergia do Si e do B estimulando a produção dos grãos de pólen em um teste laboratorial *in vivo* (Polster *et al.*, 1978) e esta pesquisa constata que esse benefício pode ser extrapolado na prática a partir do emprego da pulverização foliar destes elementos. Isso deve encorajar pesquisadores que trabalham com Si que possa incluir nas suas pesquisas dados da flor para melhor compreensão dos seus benefícios na produtividade das culturas.

4. CONCLUSÃO

Esta pesquisa indicou que o algodoeiro na fase reprodutiva é sensível a deficiência de boro e é possível melhorar a eficiência da aplicação foliar de B na cultura com adição de Si na calda ao favorecer eficiência de uso do B da flor incrementou a produção e a viabilidade dos grãos de pólen. A perspectiva futura da clara sinergia do B e do Si na concentração próxima de 1,5 e 1,0 g L⁻¹, respectivamente, na fase reprodutiva do algodoeiro possa ser melhor utilizada e explorada no campo para maior sustentabilidade da cultura e que seja realizada novas pesquisas em outras espécies.

5. REFERÊNCIAS

Alexander MP (1969) Differential staining of aborted and nonaborted pollen. **Biotechnic and Histochemistry** 44:117–122.

Aouali N, Laporte P, Clément C (2001) Pectin secretion and distribution in the anther during pollen development in *Lilium*. **Planta** 213:71–79.

- Archana PN (2021) Reproductive development and pollen-stigma interaction in sunflower plants receiving boron deficient and toxic supply. **Journal of Plant Nutrition** 16:1–10.
- Barros TC, Prado RM, Roque CG, Arf MV, Vilela RG (2019) Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition** 42:458–465.
- Bataglia OC, Teixeira JP, Furlani PR, Furlani AM, Gallo JR (1978) Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 31p.
- Bogiani JC, Amaro ACE, Rosolem CA (2013) Carbohydrate production and transport in cotton cultivars grown under boron deficiency. **Scientia Agricola** 70:442–448.
- Boylston EK, Hebert JJ, Hensarling TP, Bradow JM, Thibodeaux DP (1990) Role of silicon in developing cotton fibers. **Journal of Plant Nutrition** 13:131–148.
- Crang RE, May G (1974) Evidence for silicon as a prevalent elemental component in pollen wall structure. **Canadian Journal of Botany** 52:2171–2174.
- Dafni A (1992) Pollination ecology: a practical approach. Oxford: Oxford University Press.
- Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Rebers PT, Smith F (1956) Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry** 28:350–356.
- Fang KF, Du BS, Zhang Q, Xing Y, Cao QQ, Qin L (2019) Boron deficiency alters cytosolic Ca^{2+} concentration and affects the cell wall components of pollen tubes in *Malus domestica*. **Plant Biology** 21:343–351.
- Ferreira DF (2014) Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciencia e Agrotecnologia** 38:109–112.
- Frazão JJ, Prado RM, Souza Júnior JP, Rossatto DR (2020) Silicon changes C:N:P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. **Scientific Reports** 10:e12492.
- Golaszweska B, Bednarska E (1999) Immunocytochemical localization of pectins in the maturing anther of *Allium cepa* L. **Folia Histochemica et Cytobiologica** 37:199–208.
- He C, Ma J, Wang L (2015) A hemicellulose-bound form of silicon with potential to improve the mechanical properties and regeneration of the cell wall of rice. **The New Phytologist** 206:1051–1062.

- Iwai H, Hokura A, Oishi M, Chida H, Ishii T, Sakai S, Satoh S. (2006) The gene responsible for borate cross-linking of pectin Rhamnogalacturonan-II is required for plant reproductive tissue development and fertilization. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America** 103:16592–16597.
- Kamenidou S, Cavins TJ, Marek S (2009) Evaluation of silicon as a nutritional supplement for greenhouse zinnia production. **Scientia Horticulturae** 119:297–301.
- Kamenidou S, Cavins TJ, Marek S (2010) Silicon supplements affect floricultural quality traits and elemental nutrient concentrations of greenhouse produced gerbera. **Scientia Horticulturae** 123:390–394.
- Kido N, Yokoyama R, Yamamoto T, Furukawa J, Iwai H, Satoh S, Nishitani K (2015) The matrix polysaccharide (1;3,1;4)-2-d-glucan is involved in silicon-dependent strengthening of rice cell wall. **Plant and Cell Physiology** 56:268–276.
- Klotzbücher T, Klotzbücher A, Kaiser K, Vetterlein D, Jahn R, Mikutta R (2018) Variable silicon accumulation in plants affects terrestrial carbon cycling by controlling lignin synthesis. **Global Change Biology** 24:e183–e189.
- Kondörfer GH, Pereira HS, Nola A (2004) Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 18p.
- Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communication in Soil Science and Plant Analise** 41:2075–2085.
- Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 67:4113–4121.
- Leonard A, Holloway B, Guo M, Rupe M, Yu G, Beatty M, Zastrow-Hayes G, Meeley R, Llaca V, Butler K, Stefani T, Jaqueth J, Li B (2014) Tassel-less1 encodes a boron channel protein required for inflorescence development in maize. **Plant and Cell Physiology** 55:1044–1054.
- Mantovani C, Prado RM, Pivetta KFL (2018) Silicon foliar application on nutrition and growth of Phalaenopsis and Dendrobium orchids. **Scientia Horticulturae** 241:83–92.
- Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017) Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports** 7:1–8.
- Nyomora MAS, Brown PH, Pinney K, Polito VS (2000) Foliar application of boron to almond trees affects pollen quality. **Journal of the American Society for Horticultural Science** 125:265–270.

Oosterhuis DM, Zhao D (2001) Effect of boron deficiency on the growth and carbohydrate metabolism of cotton. In: Horts WJ, Schenk MK, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer B, Goldbach H, Olf HW, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schuvert S, Wirém NV, Wittenmayer L (EDs) **Plant Nutrition**. Dordrecht: Springer, p.166–167.

Pereira GL, Siqueira JA, Silva WB, Cardoso FB, Nesi AN, Araújo WL (2021) Boron: More Than an Essential Element for Land Plants?. **Frontiers in Plant Science** 11:e2234.

Polster J, Schwenk M, Bengsch E (1978) The role of boron, silicon and nucleic bases on pollen tube growth of *lilium longiflorum* (L.). **Zeitschrift für Naturforschung - Section C Journal of Biosciences** 47:102–108.

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

Rerkasem B, Jamjod S, Pusadee T (2020) Productivity limiting impacts of boron deficiency, a review. **Plant and Soil** 15:1-8.

Sharafi Y, Raina M (2020) Effect of boron on pollen attributes in different cultivars of *Malus domestica* L. **National Academy Science Letters** 13:1–6, 2020.

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

Souza Junior JP, Prado RM, Sarah MMS, Felisberto G (2019) Silicon mitigates boron deficiency and toxicity in cotton cultivated in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 182:805–814.

Souza Junior JP, Prado RM, Soares MB, Silva JLF, Guedes VHF, Sarah MMS, Cazetta JO (2020) Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:95-103.

CAPÍTULO 4 – Silício via foliar na fase reprodutiva do algodoeiro contribui com o boro para aumentar a produtividade e a qualidade da fibra

RESUMO

O boro (B) é importante na fase reprodutiva do algodoeiro, por aumentar a produtividade e, especialmente, a qualidade da fibra. Há indicação que a demanda de silício (Si) é alta durante a fase de desenvolvimento da fibra, podendo-se inferir que haja efeitos semelhantes, destes dois elementos na cultura. O fornecimento via aplicação foliar da mistura B associado ao Si na fase reprodutiva da cultura poderia ampliar os benefícios para além dos efeitos na produtividade, atingindo atributos de qualidade da fibra, mas, faltam pesquisas. Foram realizados dois experimentos, objetivando-se avaliar se a aplicação foliar de Si tem papel semelhante à aplicação de B na produtividade e na qualidade da fibra do algodão e se a mistura destes elementos poderia ampliar os benefícios na cultura, especialmente, na qualidade da fibra. Os experimentos foram realizados com algodoeiro cultivar FM 906 GLT em condição de campo, sendo o experimento I na safra 2018/2019, e o II na safra 2019/2020, no município de Chapadão do Sul, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. Ambos os experimentos foram delineados em blocos casualizados com quatro tratamentos: água (controle); boro foliar ($1,5 \text{ g L}^{-1}$ de B); silício foliar ($1,15 \text{ g L}^{-1}$ de Si); e boro + silício foliar ($1,5 \text{ g L}^{-1}$ de B + $1,15 \text{ g L}^{-1}$ de Si) em seis repetições. Realizou-se teste laboratorial preliminar com soluções com B+Si, avaliando o índice de turbidez, para determinar a compatibilidade para a mistura destes elementos. Os tratamentos foram aplicados a partir de quatro aplicações foliares, iniciando no estágio reprodutivo B1 (um botão floral no primeiro ramo reprodutivo), com intervalos de 7 a 11 dias. Com as plantas em pleno florescimento, foi realizado, no experimento I, avaliações da concentração interna de CO_2 , taxa líquida de fotossíntese e eficiência de uso da água. Em ambos os experimentos, foi realizada a avaliação do estado nutricional para B e Si e, também, a produtividade e a qualidade da fibra das plumas do algodão. A aplicação foliar de B isolado e associado com Si tem mesmo efeito no aumento do teor de B foliar, indicando sua compatibilidade. A aplicação foliar de B e Si isolados e associados tem efeitos semelhantes para incrementar a concentração interna de CO_2 ; a fotossíntese; a

eficiência do uso da água; a produtividade e a qualidade de fibra de plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B. Nossos resultados evidenciam, de forma inédita, que, o Si tem efeito semelhante ao B via foliar na produtividade e na qualidade da fibra do algodoeiro e, quando associados, se destacam, tendo efeito adicional na fibra, aumentando a resistência de ruptura e diminuindo o índice de fibra curta.

Palavras-Chave: Elemento benéfico. Micronutriente. *Gossypium hirsutum*.

1. INTRODUÇÃO

A deficiência de boro (B) é um problema comum em regiões produtoras de algodão, principalmente, em solos ácidos, textura arenosa e com baixo teor de matéria orgânica, causando prejuízos significativos na produção e na qualidade de fibra da cultura (Ahmed et al., 2020; Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Wahid et al., 2020). Essa desordem nutricional ocasiona deformação nos feixes vasculares do xilema, diminuindo o transporte de água e nutrientes, além de modificar a densidade estomatal e reduzir a condutividade do CO₂, e, conseqüentemente, a taxa fotossintética (Li et al., 2017).

O benefício do B em destaque seria seu papel fundamental na reprodução das plantas (Leonard et al., 2014), pois, neste estágio, as plantas apresentam maior exigência nutricional desse elemento, comparado ao estágio vegetativo (Prado, 2021). Nessa fase, a deficiência do micronutriente pode promover danos na formação da inflorescência, na germinação de grãos de pólen e até na formação de sementes e de frutos (Dell e Huang, 1997; Zhao e Oosterhuis, 2002, 2003), além de diminuir o transporte de fotoassimilados para as flores e os frutos (Oosterhuis e Zhao, 2001) e, também, a produtividade do algodoeiro. Outro prejuízo importante da deficiência de B no algodoeiro seria na qualidade da produção, posto que, este micronutriente participa da biossíntese de lignina, pectina, celulose e hemicelulose presentes na fibra (O'Neill et al., 2004; Oliveira et al., 2006) e sua falta diminui atributos tecnológicos da fibra como a resistência à ruptura, comprimento e fineza das fibras e aumenta o índice de fibras curtas (Atique-Ur-Rehman et al., 2020), depreciando a sua qualidade.

Em face disso, é importante o fornecimento de B para o algodoeiro, podendo ser via solo (Kumar et al., 2018; Atique-Ur-Rehman et al., 2020), ou via foliar (Kumar et al., 2018; Ahmed et al., 2020) durante a fase reprodutiva, para propiciar incremento da produção e da qualidade de fibra. No entanto, apesar desta última forma de aplicação de B seja muito utilizada no campo, as pesquisas ainda são incipientes para a cultura do algodão.

Descobertas recentes indicaram que a aplicação foliar de silício (Si) em algodoeiro deficiente de B incrementa a eficiência fotossintética das plantas de

algodão cultivadas em condição controlada (Souza Junior et al., 2019, 2020), e a sua produtividade em condição de campo (Barros et al., 2019). Soma-se a isto o fato que o Si pode ser importante na formação da fibra, por formar complexo com pectinas, caloses, taninos e amidos (Boylston et al., 1990), pois, a concentração deste elemento é alta durante a fase de alongamento da fibra de algodão (aproximadamente, do 1° ao 21° dia, após a antese) (Boylston, 1988). Portanto, é possível que, a aplicação foliar de Si na fase reprodutiva da cultura tenha acréscimo da concentração de Si na fibra e possa afetar sua formação e favorecer os seus atributos qualitativos, mas, esses efeitos são desconhecidos. Isso é relevante, porque, as características tecnológicas da fibra de algodão, com índice de fibras curtas, comprimento, resistência à ruptura e micronaire determinam a qualidade do produto e seu valor econômico no mercado.

Para ampliar o efeito do B aplicado via foliar no algodoeiro pode-se incluir o Si à calda de aplicação, mas, é necessário ter compatibilidade química destes elementos em solução. Para tanto, o grande problema a ser vencido é o risco da polimerização do Si em solução aquosa, que forma polímeros do elemento com forma química diferente da absorvida pela planta (H_4SiO_4) (Birchall, 1995; Zhuravlev, 2000). O processo de polimerização do Si em solução aquosa é afetado pelo valor pH e pela concentração de Si na solução (Haynes, 2019) e, também, pela presença de estabilizantes (Souza Junior et al., 2020).

O uso do sorbitol promove estabilidade do Si em solução na forma monomérica (H_4SiO_4), diminuindo a taxa de polimerização desse elemento benéfico e favorece a sua absorção, quando aplicado via foliar, verificado em plantas de algodão (Souza Junior et al., 2019 2020), ervilha (Oliveira et al., 2020), girassol (Flores et al., 2019) e tomate (Moraes et al., 2020) mas, sem adição de B na calda de pulverização. As informações acerca das concentrações adequadas de B e Si, para a mistura em calda e que sejam estáveis são incipientes, sendo fator preocupante, pois, as respostas das culturas dependem da forma química disponível dos elementos em solução para a absorção foliar.

Nesse cenário, objetivou-se testar as hipóteses se o Si e o B aplicados de forma isolada via foliar na fase reprodutiva do algodoeiro têm efeitos semelhantes nas trocas gasosas, produtividade e na qualidade da fibra; havendo esse efeito

semelhante do Si e do B na planta espera-se que a mistura B+Si, não havendo problemas de polimerização, possa ter efeito somatório, beneficiando a produtividade e, principalmente, incrementando atributos de qualidade da fibra (Figura 1).



Figura 1. Esquema hipotético do efeito da aplicação foliar de água (controle), de boro (B), de silício (Si) e da mistura boro + silício (B+Si) e na fibra (Produtividade, micronaire, comprimento, resistência a ruptura e índice de fibras curtas). Figura criada com o BioRender.com

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e características da área experimental

Os experimentos foram conduzidos com algodão cultivar FM 906 GLT em condição de campo, sendo o experimento I na safra 2018/2019, semeado no dia 10 de janeiro de 2019, e o experimento II na safra 2019/2020, semeado no dia 14 de janeiro de 2020, ambos realizados na Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Chapadão (18°41'33" S e 52°40'45" O), no município de Chapadão do Sul, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil.

O clima da região é classificado como tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno, precipitação e temperatura média anual de 1627 mm e 22.5°C, respectivamente. Os valores de precipitação pluvial (mm), e temperaturas máximas e mínimas do ar (°C) da área experimental foram registrados durante o período experimental (Figura 2).

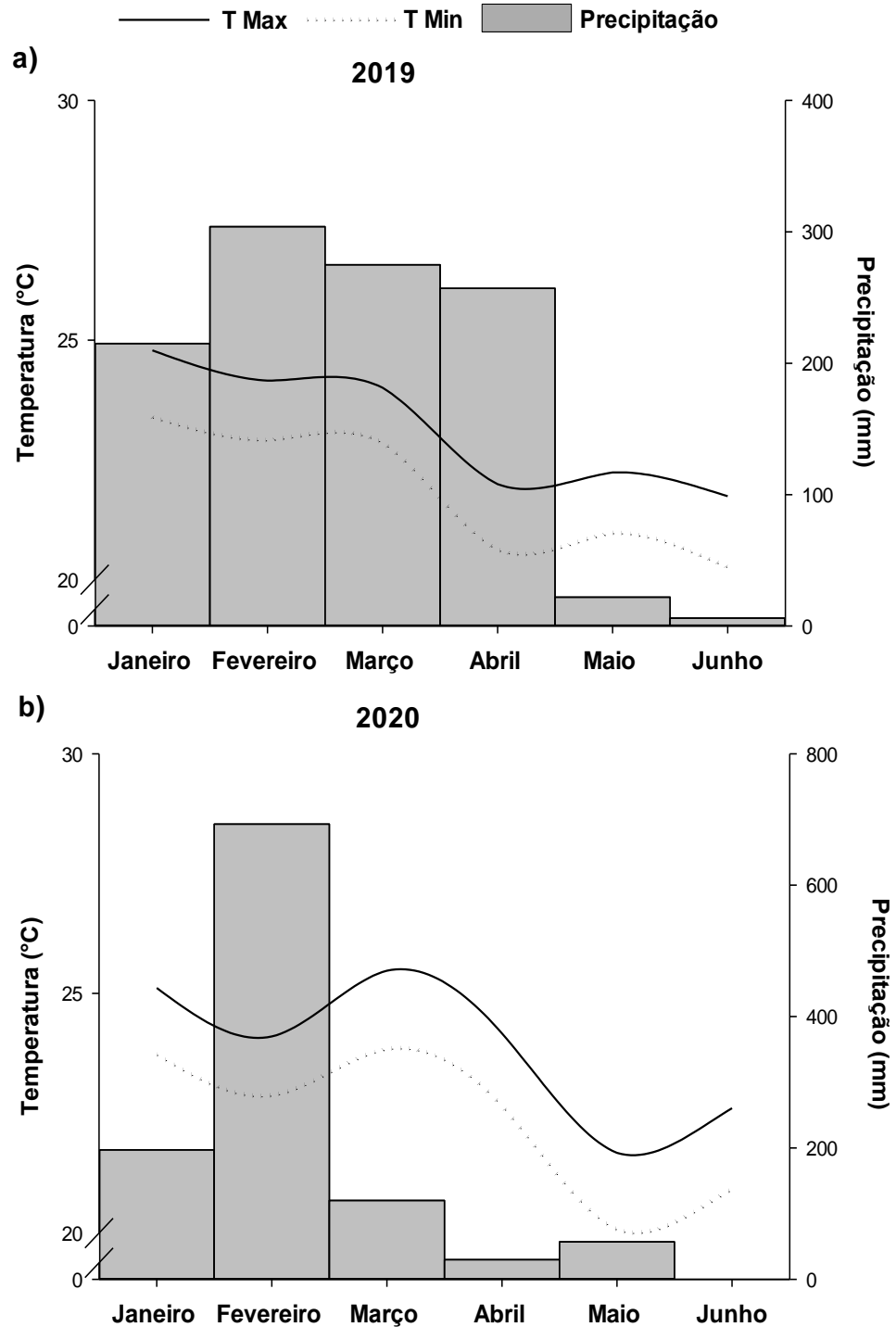


Figura 2. Temperatura máxima (T Max) e mínima (T Min) e precipitação em Chapadão do Sul -MS, Brasil, durante o período experimental do experimento I (a) e II (b).

O solo da área experimental foi um Latossolo Vermelho distrófico (Santos et al., 2018) e, antes da instalação do experimento, foi realizada amostragem do solo na camada de 0 a 20 cm de profundidade. Em seguida, procedeu-se à análise química para fins de fertilidade, conforme metodologia descrita por Raij et al. (2001) apresentando os seguintes resultados para experimentos I e II, respectivamente: pH (CaCl₂): 4,7 e 5,3; P (resina): 16,2 e 52,0 mg dm⁻³; matéria orgânica: 29 e 23 g dm⁻³; K: 111 e 113 mg dm⁻³; Ca: 4,1 e 2,7 cmol_c dm⁻³; Mg: 1,00 e 0,97 cmol_c dm⁻³; S: 10,4 e 7,8 mg dm⁻³; H+Al: 3,80 e 4,48 cmol_c dm⁻³; Al: 0,12 e 0,01 cmol_c dm⁻³; Cu: 0,90 e 1,50 mg dm⁻³; Fe: 31,0 e 32,2 mg dm⁻³; Mn: 16,7 e 22,2 mg dm⁻³; Zn: 5,50 e 9,75 mg dm⁻³; e B: 0,03 e 0,04 mg dm⁻³. Destaca-se o teor de B no solo, sendo baixo para o cultivo de algodão (Zhao e Oosterhuis, 2003; Ahmed et al., 2013; Atique-Ur-Rehman et al., 2020;).

O preparo do solo da área experimental foi realizado por duas gradagens e uma aragem. Não havendo necessidade de calagem, o experimento I foi adubado na linha de plantio com 16,5 kg ha⁻¹ de N e 178 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de fosfato monoamônico; e em cobertura, com as plantas em F1 (início do florescimento) com 108 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio e com 160 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia, divididos em três aplicação aos 22, 55 e 90 dias após a emergência. O experimento II foi adubado com 160 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na forma de fosfato monoamônico; e em cobertura com, aos 22, 55 e 90 dias após emergência com 160 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia, e de K₂O, na forma de KCl.

2.2 Delineamento, parcela experimental e aplicação dos tratamentos

Ambos os experimentos foram delineados em blocos casualizados com quatro tratamentos: água (controle); boro foliar (1,5 g L⁻¹ de B); silício foliar (1,15 g L⁻¹ de Si); e boro + silício foliar (1,5 g L⁻¹ de B + 1,15 g L⁻¹ de Si), em seis repetições. As concentrações de B e de Si foram definidas, a partir do teste de polimerização da calda, mensurada pelo teste de turbidez e registros de mudança na coloração

da mistura B+Si. O valor pH da solução foi mensurado antes da aplicação foliar, sendo 7,1; 8,5; 10,9 e 9,1 para água, boro, silício e boro + silício, respectivamente.

A parcela experimental foi constituída de quatro linhas com cinco metros de comprimento e espaçamento de 0,90 m. A área útil foi composta por três linhas centrais com três metros de comprimento, totalizando 8,1 m².

Foi utilizado ácido bórico (B: 175 g kg⁻¹; densidade: 1,43 g cm⁻³; solubilidade em água a 20°C: 47,2 g L⁻¹) como fonte de boro, sendo o pH da calda boratada ajustado para 9,0 ± 0,2, com uso da solução NaOH (1 M). Como fonte de Si, foi utilizado o silicato de potássio estabilizado com sorbitol (SiKE) (Si: 115 g L⁻¹; K₂O: 113,85 g L⁻¹; sorbitol: 100 mL L⁻¹; pH:12,0). O potássio foi equilibrado entre os tratamentos, com o uso de KCl.

Foram realizadas quatro aplicações foliares, iniciando no estágio reprodutivo B1 (um botão floral no primeiro ramo reprodutivo), com intervalos de 7 a 11 dias, variando, devido a condições climáticas (precipitação pluvial). As aplicações foram realizadas com pulverizador de pressão de CO₂ Herbicat[®], regulado para uma taxa de aplicação de 200 L ha⁻¹ de calda, com pressão de serviço de 2 bares, sob uma barra de 6 bicos, espaçados 50 cm entre si. As condições meteorológicas no momento das aplicações foram verificadas, estando a temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento < 26°C; >60% e < 8 km h⁻¹, respectivamente, sendo favoráveis para aplicação foliar (Prado, 2021).

2.3 Teste de homogeneidade da solução boro associado a silício

Para determinar a homogeneidade da solução silicatada, foram realizadas duas avaliações do índice de turbidez de calda da mistura boro + silício, pois, o aumento desse valor na solução, seria indicativo da ocorrência de polimerização. Os grupos silanol são formados durante a polimerização e condensação do Si(OH)₄. A solução supersaturada do ácido é convertida em sua forma polimérica e, a posteriori, se transforma em partículas coloidais esféricas insolúveis (Zhuravlev, 2000), e a agregação destas partículas formam cadeias longas no formato de redes, induzindo alteração visível da tonalidade da solução, de translúcida, para opaca ou turva. A avaliação do índice de turbidez teria a vantagem

para detectar essa mudança da tonalidade da solução silicatada que possa estar ocorrendo antes da fase do visível.

A concentração de B da solução teve valor fixo igual a $1,5 \text{ g L}^{-1}$, sendo a maior concentração indicada para aplicação foliar do micronutriente com incremento na produtividade (Görmüs, 2005; Howard et al., 1980; 2000). A avaliação I consistiu em adicionar à solução boratada ($1,50 \text{ g L}^{-1}$), o silício em concentrações iguais a $1,00$; $1,25$ ou $1,50 \text{ g L}^{-1}$. Entretanto, foi necessário repetir o teste, tendo a avaliação II utilizado a mistura B ($1,50 \text{ g L}^{-1}$), com intervalos menores entre as concentrações de Si iguais a $1,00$; $1,05$; $1,10$; $1,15$; ou $1,20 \text{ g L}^{-1}$. Nas duas avaliações, foram utilizados o SiKE como fonte de Si e H_3BO_3 , como fonte de B, para compor a solução com volume final de 50 mL , pH ajustado em $9,05 \pm 0,02$ com solução de HCl (1M) ou NaOH (1M) à temperatura de 20°C em três repetições. Após preparo da calda, o índice de turbidez foi mensurado com uso do aparelho turbidímetro microprocessado TecnoPON® (modelo TB1000) aos 30, 60, 90, 120, 180, 240, 300 e 360 minutos, e foram realizados registros fotográficos, após 180 minutos.

Para os registros fotográficos, foi utilizado câmera com 64 MP resolução 9238×6928 pixels. Os béqueres com as soluções foram acondicionados em bancada forrada com pano na cor preta, sendo então fotografados, após 180 minutos do preparo. As imagens foram trabalhadas com o Adobe Photoshop® para melhorar o contraste com o fundo preto, sem alteração na coloração da solução, indicador visual do processo de polimerização.

2.4 Manejo fitossanitário

No manejo fitossanitário da cultura, no experimento I, foi realizado controle de plantas daninhas com aplicação de $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de glifosato ($792,5 \text{ g kg}^{-1}$); $1,2 \text{ L ha}^{-1}$ de S-Metalocloro (960 g L^{-1}); e $1,2 \text{ L ha}^{-1}$ de glufosinato-sal de amônio (200 g L^{-1}) em pós-emergência.

Os inseticidas utilizados foram: 1 L ha^{-1} de carbofentio (700 g L^{-1}); $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ de clorfenapir (240 g L^{-1}); 800 mL ha^{-1} de diafenturon (500 g L^{-1}); 500 mL ha^{-1} de espiromesifeno (240 g L^{-1}); 1 L ha^{-1} de etiprole (200 g L^{-1}); 100 mL ha^{-1} de fipronil

(800 g kg⁻¹); 150 mL ha⁻¹ de flubendiamida (480 g L⁻¹); 600 mL ha⁻¹ de indoxacarbe (150g L⁻¹); 1,8 L ha⁻¹ de malationa (100 g L⁻¹), 400 mL ha⁻¹ de novalurom (100g L⁻¹); 200 mL ha⁻¹ de teflubenzurom (150g L⁻¹); 500 g ha⁻¹ de tiodicarbe (800 g kg⁻¹); 400 mL ha⁻¹ da mistura clorantraniliprole (100 g L⁻¹) + lambda-Cialotrina (50g L⁻¹); 300 mL ha⁻¹ da mistura metoxifenoazida (240 g L⁻¹) + espinetoram (120g L⁻¹); e 300 mL ha⁻¹ da mistura tiametoxam (141 g L⁻¹) + lambda-cialotrina (106 g L⁻¹).

O tratamento com fungicidas foi realizado com 1,5 L ha⁻¹ de clorotalonil 720 g L⁻¹; 500 mL ha⁻¹ de difenoconazol (250 g L⁻¹); 500 ml ha⁻¹ de hidróxido de fentina 400 g L⁻¹); e 350 ml ha⁻¹ da mistura fluxapiróxade (167 g L⁻¹) + piraclostrobina (333 g L⁻¹).

Foi aplicado reguladores de crescimento, com início no dia 6 de março de 2019 com aplicações semanais de 200 ml ha⁻¹ cloreto de Mepiquate (250 g L⁻¹) e finalizado no dia 15 de abril de 2019 com 3 L ha⁻¹ de cloreto de clormequate (100 g L⁻¹).

O manejo fitossanitário da cultura, no experimento II, foi realizado o controle de plantas daninhas com 3 L ha⁻¹ de glifosato (588 g L⁻¹); e 500 mL ha⁻¹ de tidiazuron (120 g L⁻¹).

Os inseticidas utilizados foram 1,8 L ha⁻¹ de abamectina (18 g L⁻¹); 200 g ha⁻¹ de acetamiprido (200 g kg⁻¹); 1,8 L ha⁻¹ de carbosulfano (700 g L⁻¹); 1,5 L ha⁻¹ de espiromesifeno (240 g L⁻¹); 2,25 L ha⁻¹ de etiprole (200 g L⁻¹); 1 L ha⁻¹ de fipronil (250 g L⁻¹); 100 g ha⁻¹ de imidacloprido (700 g L⁻¹); 4,5 L ha⁻¹ de malationa (1000 g L⁻¹); 1,6 L ha⁻¹ de metomil (215 g L⁻¹); 150 mL ha⁻¹ de novaluron (100 g L⁻¹); 300 mL ha⁻¹ de piriproxifem (100 g L⁻¹); 500 g ha⁻¹ de tiodicarbe (800 g kg⁻¹); e 3 L ha⁻¹ da mistura beta-ciflurtrina (12,5 g L⁻¹) + imidacloprido (100 g L⁻¹).

2.5 Avaliações fisiológicas

Com as plantas em pleno florescimento, foram realizadas, no experimento I, avaliações da concentração interna de CO₂ e da taxa líquida de fotossíntese, e foi calculada a eficiência de uso da água.

A concentração interna de CO₂ e a taxa líquida de fotossíntese foram mensuradas, por meio de leituras com radiação infravermelha (Infra RedGas

Analyser -IRGA Li-COR LI-6400 XT Portable®). O aparelho foi regulado para irradiância de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fótons, mixer $380 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de CO_2 , e flow de $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Para determinação do pulso de luz saturante ($1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), foi construída, previamente, uma curva fotossintética de resposta da planta à luz (A –RFA), em condições de $[\text{CO}_2]$ ambiente ($\sim 473 \mu\text{mol mol}^{-1}$). Os valores de fotossíntese foram registrados em pulsos de luz saturantes de 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A partir da curva gerada, determinou-se a máxima intensidade luminosa que provocava a maior taxa fotossintética pela cultura do algodão. As avaliações fisiológicas foram realizadas entre 8:00 e 10:00 da manhã, com temperatura abaixo dos 25°C e umidade relativa do ar acima de 60%.

A eficiência do uso da água foi calculada como a razão entre a taxa líquida de fotossíntese e a transpiração ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$).

2.6 Amostragem e análise do teor de Si e B foliar

Uma semana após a quarta aplicação foliar em ambos experimentos foi realizada amostragem de 10 folhas por parcela, considerando a quinta folha completamente expandida, a partir do ápice (Malavolta et al., 1997).

As amostras foliares foram descontaminadas com uso de água, solução detergente neutra (0,1%), solução HCl (0,3%) e água deionizada e secas em estufa a $65 \pm 5^\circ\text{C}$ até obtenção de massa constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley. Em seguida, realizou-se a análise química das folhas para determinar o teor de Si, a partir da digestão alcalina com H_2O_2 e NaOH, e reação colorimétrica com molibdato de amônio, sendo determinada por leitura colorimétrica em espectrofotômetro, de acordo com metodologia descrita por Kondörfer et al. (2004); e teor de B, a partir de digestão via seca em mufla a 400°C por três horas e reação colorimétrica com H-Azometina, seguida por leitura colorimétrica em espectrofotômetro, de acordo com metodologia descrita por Bataglia et al. (1983).

2.7 Produtividade, teor de Si e B nas plumas e avaliação da qualidade de fibra

Com a abertura dos capulhos, aos 179 e 176 dias após a semeadura nos experimentos I e II, respectivamente, foi realizada a colheita da área útil, sendo estimada a produtividade e mensurada a qualidade de fibra das plumas do algodão. Para a produtividade, foram colhidas todas as maçãs de algodão dentro da área útil (8,1 m²), sendo, então, pesadas e extrapolado para produção em 1 ha (10.000 m²).

Foram coletadas amostras aleatórias das plumas após colheita, sendo determinado o teor de Si e de B conforme descrito anteriormente.

As avaliações da qualidade de fibra foram realizadas a partir do equipamento HVI (High Volume Instrument), sendo mensurados na fibra o micronaire, o comprimento, a resistência a ruptura e o índice de fibras curtas, segundo método descrito por Fonseca e Santana (2002).

2.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste F) e quando significativo, comparados a partir do teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para o estudo de polimerização foi utilizado modelo de crescimento exponencial. Modelos singulares, com um ou dois parâmetros foram testados, sendo aplicados os modelos com melhor ajuste dos dados, indicados pelo maior coeficiente de regressão a 5% pelo teste T.

As análises estatísticas foram realizadas com o Sisvar[®] (Ferreira, 2014) e os gráficos com utilização do SigmaPlot[®].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estabilidade da mistura B+Si e teor de B e Si no algodoeiro

A adição de $1,00 \text{ g L}^{-1}$ de Si na forma de SiKE à calda boratada ($1,50 \text{ g L}^{-1}$), não incrementou o índice de turbidez da calda, com valor médio de $0,41 \text{ NDU}$, durante período de 360 minutos, após preparo (Figura 3a).

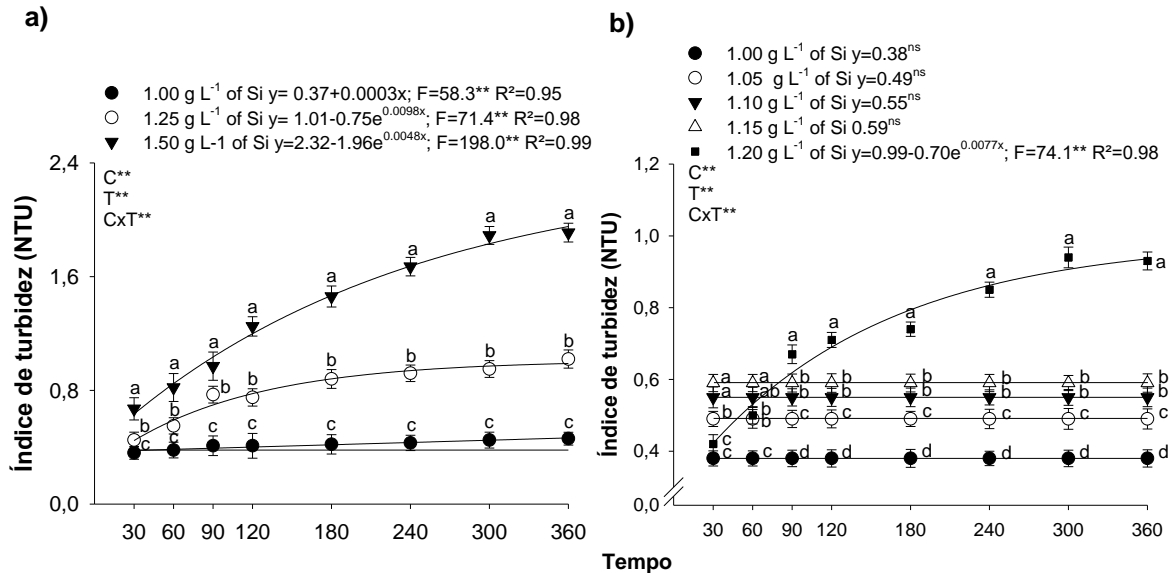


Figura 3. Índice de turbidez da mistura boro ($1,5 \text{ g L}^{-1}$) + silício ($1,00$; $1,25$ e $1,50 \text{ g L}^{-1}$) (a); e boro ($1,5 \text{ g L}^{-1}$) + silício ($1,00$; $1,05$; $1,10$; $1,15$ e $1,20$ $1,50 \text{ g L}^{-1}$) em função do tempo após preparo da calda.

Em adição, no decorrer da avaliação, não foi observado modificação na coloração da calda, indicando, possivelmente, a não ocorrência de polimerização (Figura 4a). O aumento na concentração de Si para $1,25$ e $1,50 \text{ g L}^{-1}$ resultou em aumento exponencial do índice de turbidez, atingindo $1,02$ e $1,91 \text{ NDU}$ aos 360 min, após preparo, respectivamente (Figura 3a). Por consequência, a coloração da solução teve aspecto opaco, evidenciando possível processo de polimerização (Figura 4a). Portanto, notou-se que, a concentração de Si adequada na calda possa estar na faixa de $1,00$ a $1,25 \text{ g L}^{-1}$.

A segunda avaliação teve maior número de concentrações de Si estudadas e indicou que, a concentração limite para adição deste elemento, na forma de SiKE, à solução boratada com $1,50 \text{ g L}^{-1}$ de B é de $1,15 \text{ g L}^{-1}$ de Si (Figura 3b). Tal indicação ocorreu, porque, o aumento na concentração de $1,00 \text{ g L}^{-1}$ Si até $1,15 \text{ g L}^{-1}$ Si, não incrementou o índice de turbidez, apresentando valores médios de $0,38$; $0,49$; $0,55$; e $0,59 \text{ NDU}$ para adição de $1,00$; $1,05$; $1,10$ e $1,15 \text{ g L}^{-1}$ Si, respectivamente (Figura 3b).

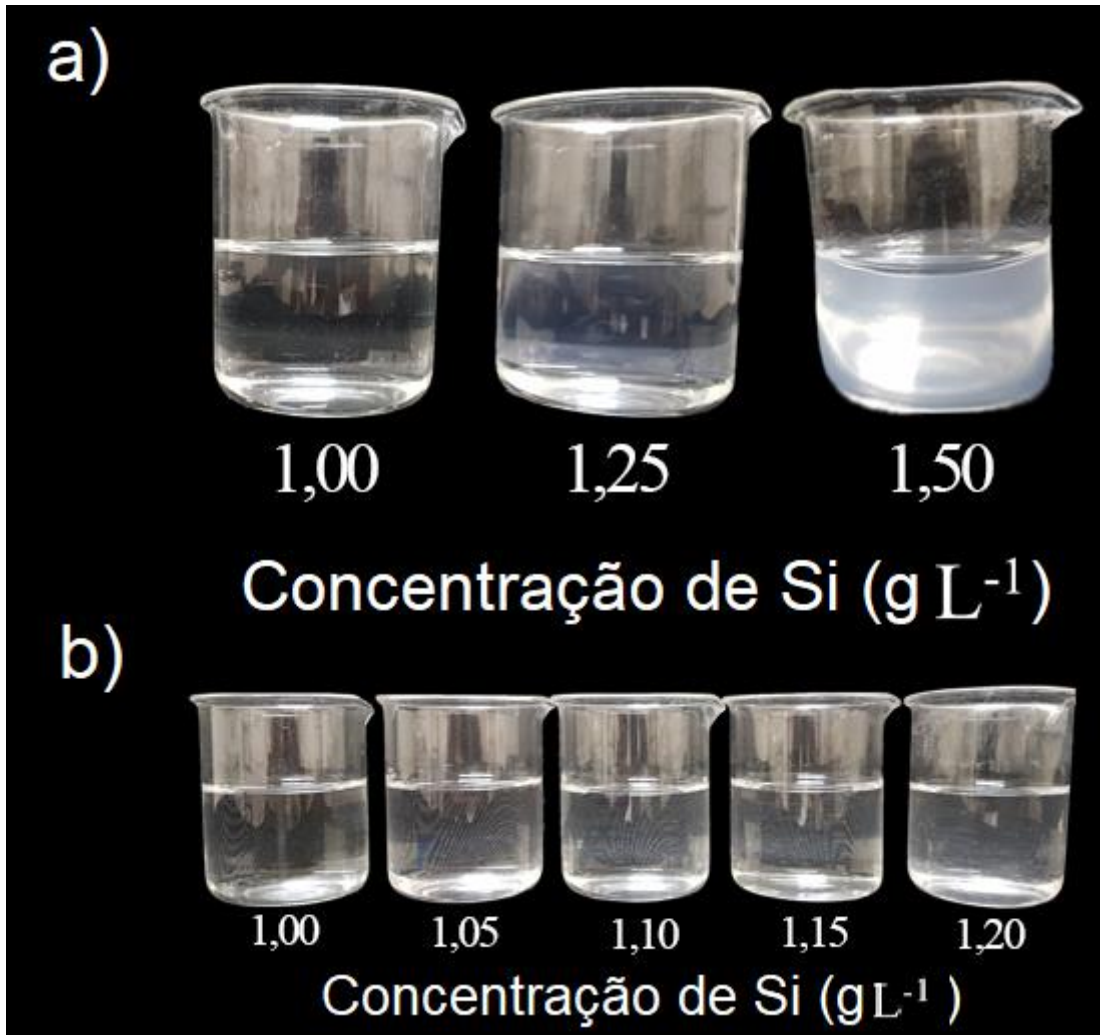


Figura 4. Avaliação da modificação colorimétrica visual na mistura boro ($1,5 \text{ g L}^{-1}$) + silício ($1,00$; $1,25$ e $1,50 \text{ g L}^{-1}$) (a); e boro ($1,5 \text{ g L}^{-1}$) + silício ($1,00$; $1,05$; $1,10$; $1,15$ e $1,20$ $1,50 \text{ g L}^{-1}$) em função do tempo após preparo da calda.

O aumento da concentração de Si para $1,20 \text{ g L}^{-1}$ de Si apresentou aumento exponencial no índice de turbidez, com valor máximo de $0,93 \text{ NDU}$, após 360 min do preparo da calda. O aumento exponencial no índice de turbidez, possivelmente, indica o início do processo de polimerização, mesmo sem alterar, visivelmente, a coloração da calda (Figura 4b).

O Si, em solução aquosa mantém estável a sua forma monomérica (H_4SiO_4) nas concentrações até 3 mM (Birchall, 1995). Portanto, em maiores concentrações do elemento, inicia-se o processo de polimerização, formando dímeros, trimeros e espécies polisilícicas e pequenas partículas se agregam, criando redes cíclicas, tornando a solução opaca ou turva e, em seguida, forma partículas coloidais em suspensão na solução, evoluindo para a formação da sílica-gel (Zhuravlev, 2000).

Observa-se que a inclusão de outro elemento na solução com Si pode acelerar as reações de polimerização. À vista disso, tentativas de formar solução estável de Si com ácido bórico são importantes para permitir a absorção pela planta, dos dois elementos.

Os nossos testes evidenciaram, pela primeira vez, que a solução contendo concentração de B e Si iguais a 1,5 e 1,15 g L⁻¹, respectivamente, resultaram soluções transparentes (Figura 4b) e com baixo índice de turbidez (Figura 3b). A confirmação destas concentrações de B e Si na mistura ter tido baixa polimerização do Si pode ser notado pela resposta da planta, havendo incremento nos teores de B e de Si no algodoeiro (Figura 5)

A aplicação foliar de B isolado foi eficiente em incrementar o teor do micronutriente, atingindo nas folhas 32,15 mg kg⁻¹ de B, no experimento I (Figura 5a) e 47,03 mg kg⁻¹ de B no experimento II (Figura 5b); e nas plumas 23,52 mg kg⁻¹ de B, no experimento I (Figura 5e) e 36,54 mg kg⁻¹ de B no experimento II (Figura 5f); e a aplicação foliar de Si foi eficiente em incrementar o teor foliar do elemento benéfico em comparação ao controle nas plantas de algodão, atingindo, nas folhas, 1,66 e 2,90 mg kg⁻¹ de Si (Figura 5c, d); e nas plumas, 1,94 e 1,34 mg kg⁻¹ de Si (Figura 5g, h) no experimento I e II, respectivamente.

O fornecimento da mistura B+Si foi eficiente em fornecer, tanto o micronutriente, quanto o elemento benéfico para as plantas de algodão, atingido nas folhas 33,65 e 49,76 mg kg⁻¹ de B e 2,76 e 1,69 mg kg⁻¹ de Si, nos experimentos I e II, respectivamente (Figura 5a, b, c, d); e nas plumas 24,25 e 38,75 mg kg⁻¹ de B e 1,82 e 1,36 mg kg⁻¹ de Si, nos experimentos I e II, respectivamente (Figura 5a, b, c, d).

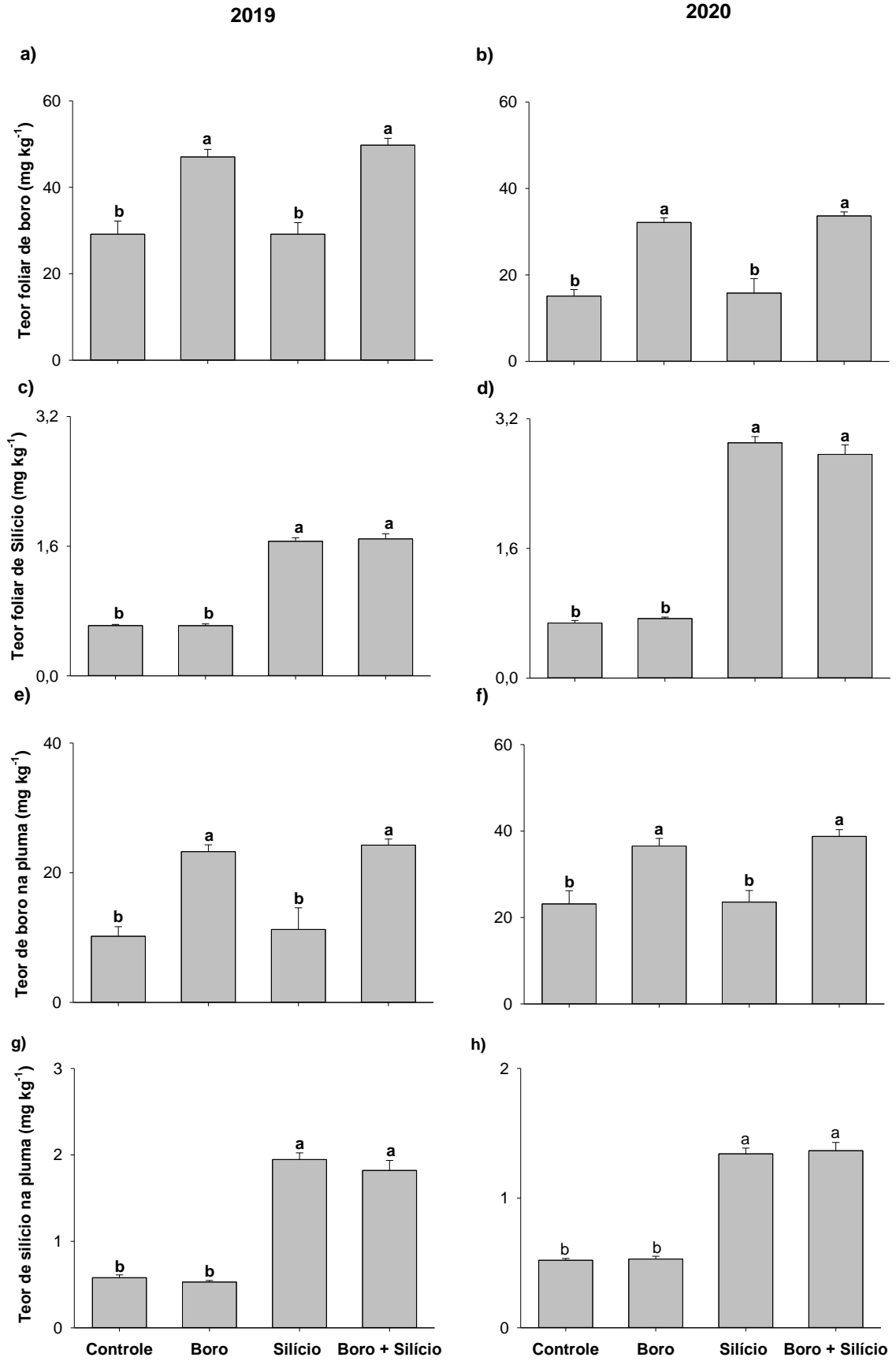


Figura 5. Teor de boro (a, b) e de silício (c, d) nas folhas, e teor de boro (e, f) e de silício (g, h) nas plumas de plantas de algodão cultivadas em solo deficiente em boro em Chapadão do Sul -MS, Brasil em 2019 e em 2020 em função de diferentes aplicações foliares.

É possível que, esse resultado, tenha recebido contribuição da adição do sorbitol, um eficiente estabilizante do Si em solução, mesmo com a presença do B (Fig. 2,3). O uso do sorbitol como estabilizante é eficiente em diminuir a polimerização da calda silicatada e incrementar o teor foliar de Si em plantas de algodão, também verificado por Souza Junior et al. (2019; 2020), e da calda boratada com adição de Si, como observado neste estudo (Figura 5). Agrega-se a isso, o fato de que, o sorbitol diminui o ponto de deliquescência da gota depositada na superfície foliar, diminuindo a velocidade de evaporação da água (Kubicki e Heaney, 2003; Will et al., 2011) e favorecendo absorção foliar dos elementos (Prado, 2021).

Desta forma, fica evidenciado, a viabilidade da mistura B+Si para pulverização foliar no algodoeiro, uma vez que, propiciou adequada absorção foliar de B e de Si.

3.2 Concentração interna de CO₂, fotossíntese e eficiência do uso da água em plantas de algodão

Foi observado maior concentração interna de CO₂ (Figura 6a) e taxa fotossintética (Figura 6b) nas plantas que receberam B, Si ou B+Si, em relação ao controle, e não houve diferença entre estes tratamentos. A adição de Si à calda boratada (B+Si) e o fornecimento de Si isolado (Si) incrementou a eficiência do uso da água, sem diferença entre estes tratamentos (Figura 6c).

A aplicação foliar de B no algodoeiro tem efeito importante nas trocas gasosas (Li et al., 2017). Observamos resultados semelhantes, uma vez que a aplicação foliar de B ou de B+Si promoveram benefícios semelhantes nas variáveis fotossintéticas (Figura 6a, b) e incrementou a eficiência de uso da água (Figura 6c), pois, esse nutriente tem papel fundamental na manutenção dos feixes vasculares do xilema (Li et al., 2017).

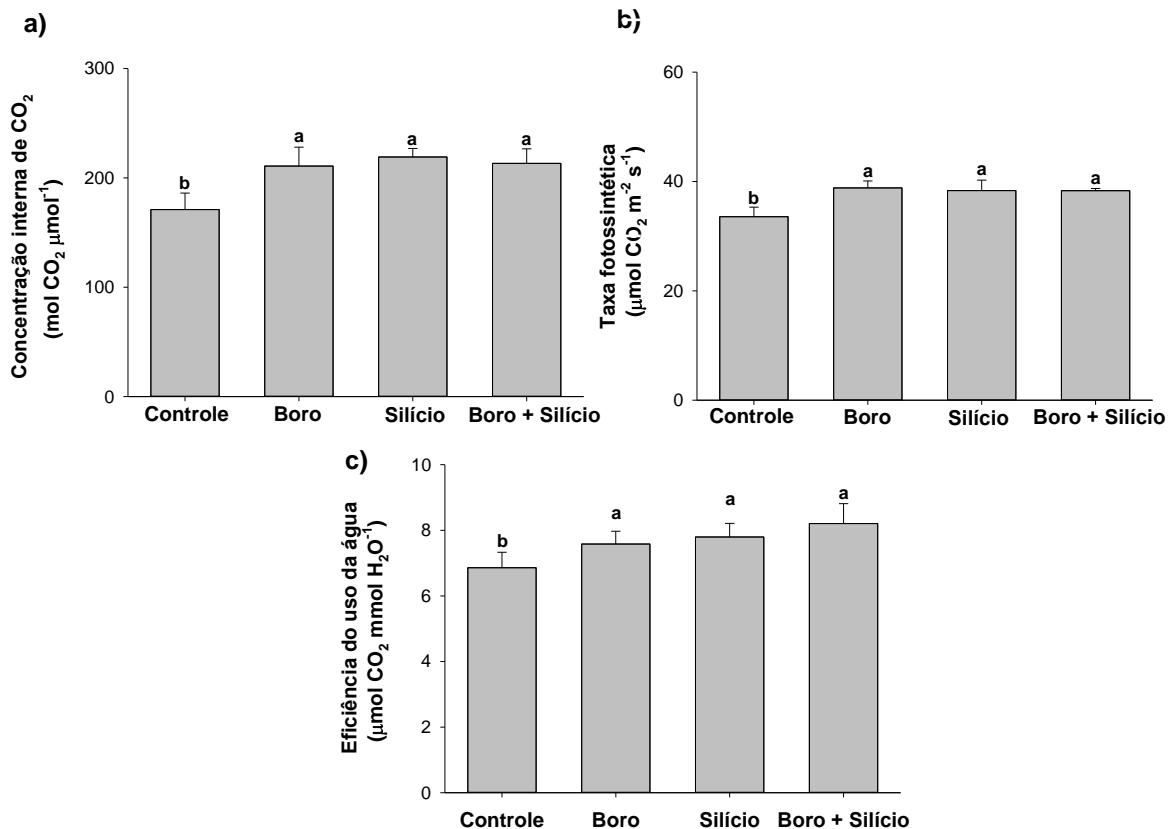


Figura 5. Concentração interna de CO₂ (a), taxa fotossintética (b), eficiência do uso da água (c) de plantas de algodão cultivadas em solo deficiente em boro em Chapadão do Sul -MS, Brasil na safra 2018/2019 em função de diferentes aplicações foliares.

O efeito benéfico do Si em incrementar as variáveis fotossintéticas e a eficiência do uso da água em plantas de algodão cultivadas, singularmente, sob estresses, são conhecidos e discutidos na literatura. O Si, semelhante ao B, contribui para manutenção dos feixes vasculares das plantas e do fluxo contínuo de água e nutrientes pelos vasos do xilema (Javaid et al., 2019). Após absorvido, o Si é depositado nas células da epiderme na forma de uma camada dupla Si-cutícula-Si (Kim et al., 2002), nas células guardas (Vandegeer et al., 2020), ou em células especializadas em armazenar Si como os fitólitos (Kumar et al., 2017, 2019), podendo diminuir a transpiração (Vandegeer et al., 2020). Em adição o aumento na concentração interna de CO₂ (Figura 5c) indica alta eficiência das trocas gasosas, elevando o substrato para a fotossíntese, contribuindo para aumento na taxa líquida fotossintética (Figura 6d). É conhecido ainda que o Si incrementa o fluxo de água (Javaid et al., 2019), e modifica a arquitetura foliar,

mantendo as folhas mais eretas, com melhor interceptação da luz solar (Raven, 1983), além de favorecer a biossíntese e manutenção de pigmentos fotossintetizantes (Souza Junior et al., 2020) e a eficiência fotossintética de plantas de algodão (Souza Junior et al., 2019). Em vista disso, o benefício da aplicação foliar de Si e B isolados ou associados, visto no *status* nutricional da planta favoreceu as trocas gasosas do algodoeiro, reforçando, o efeito semelhante destes elementos nos aspectos fisiológicos da cultura.

3.3 Produtividade e qualidade da fibra

A produtividade do algodoeiro foi incrementada pelos tratamentos, atingindo, 7815,52; 8050,62 e 8040,24 kg ha⁻¹ para B, Si e B+Si; e 5815,1; 5841,98 e 5922,22 kg ha⁻¹ para B, Si e B+Si, nos experimentos I e II, respectivamente. Este aumento representa um incremento de 27% (1674,32 kg ha⁻¹); 28% (1709,41 kg ha⁻¹) e 31% (1899,01 kg ha⁻¹), no experimento I, e de 10% (533,0 kg ha⁻¹); 11% (560,3 kg ha⁻¹) e 12% (640,74 kg ha⁻¹) no experimento II, para B, Si e B+Si, respectivamente, em comparação ao tratamento controle (6141,2 e 5281,5 kg ha⁻¹, para experimento I e II, nessa ordem) (Figura 7a, b).

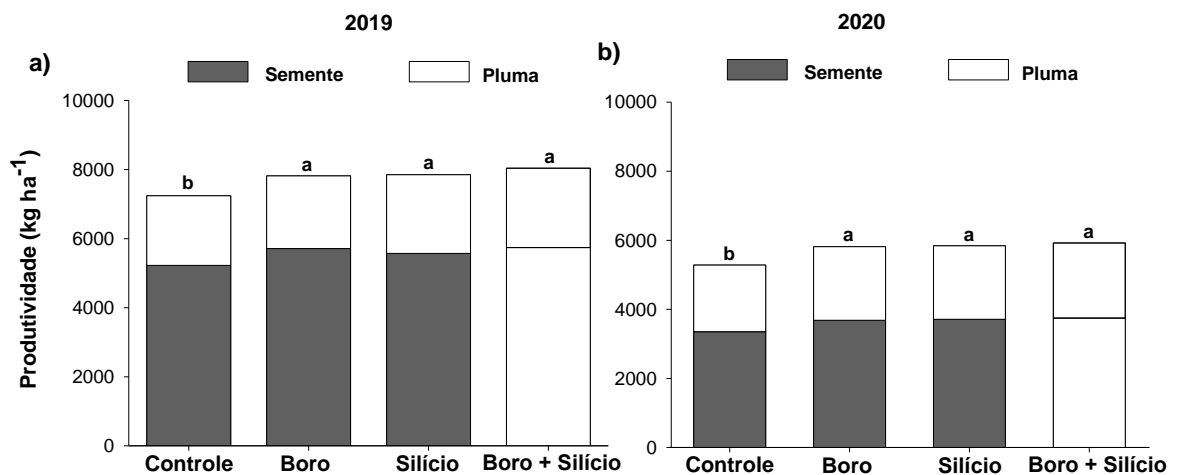


Figura 7. Produtividade de plantas de algodão cultivadas em solo deficiente em boro em Chapadão do Sul -MS, Brasil em 2019 (a) e em 2020 (b) em função de diferentes aplicações foliares.

O fornecimento de B via foliar reduziu o índice de fibras curtas, em comparação ao controle e o fornecimento de Si isolado, ou adicionado à calda boratada apresentou o menor índice de fibras curtas no experimento I (Figura 8a)

e II (Figura 8b). O fornecimento de B e Si isolados, também incrementou a resistência da fibra à ruptura, em comparação ao tratamento controle, e o fornecimento da mistura B+Si apresentou maior incremento desta variável em ambos os experimentos (Figura 8c, d). A aplicação individual de B e de Si e a aplicação da mistura B+Si aumentou valores do micronaire (Figura 8e, f) e do comprimento das fibras das plumas de algodão (Figura 8g, h), nos dois anos de estudo.

A deficiência de B reduz a produtividade e a qualidade da fibra do algodoeiro (Ahmed et al., 2020; Atique-Ur-Rehman et al., 2020; Wahid et al., 2020), como também observado neste trabalho (Figura 7, 8). Os efeitos deletérios da deficiência de B estão associados à diminuição na taxa de troca de CO₂, e na exportação de fotossintatos das folhas para os frutos, com conseqüente incremento na concentração foliar de carboidratos não estrutural e na abscisão de frutos (Zhao e Oosterhuis, 2003).

O aumento na produtividade, devido à aplicação do boro foliar é conhecido na literatura (Kumar et al., 2018; Wahid et al., 2020); e o efeito da aplicação isolada e associada ao Si, pode ser atribuído à eficiência da aplicação foliar em incrementar o teor foliar do micronutriente (Figura 5) e a concentração interna de CO₂ (Figura 6a), taxa fotossintética (Figura 6b) e eficiência do uso da água (Figura 6c) com conseqüente incremento na produtividade.

Em adição, o aumento no teor foliar de Si, pode incrementar o conteúdo de pigmentos fotossintezantes (Souza Junior et al., 2019, 2020), ao diminuir o estresse oxidativo em plantas cultivadas sob desordem nutricional por B (Oliveira et al., 2020), favorecendo a eficiência quântica do fotossistema II, visto em plantas de algodão (Souza Junior 2019, 2020).

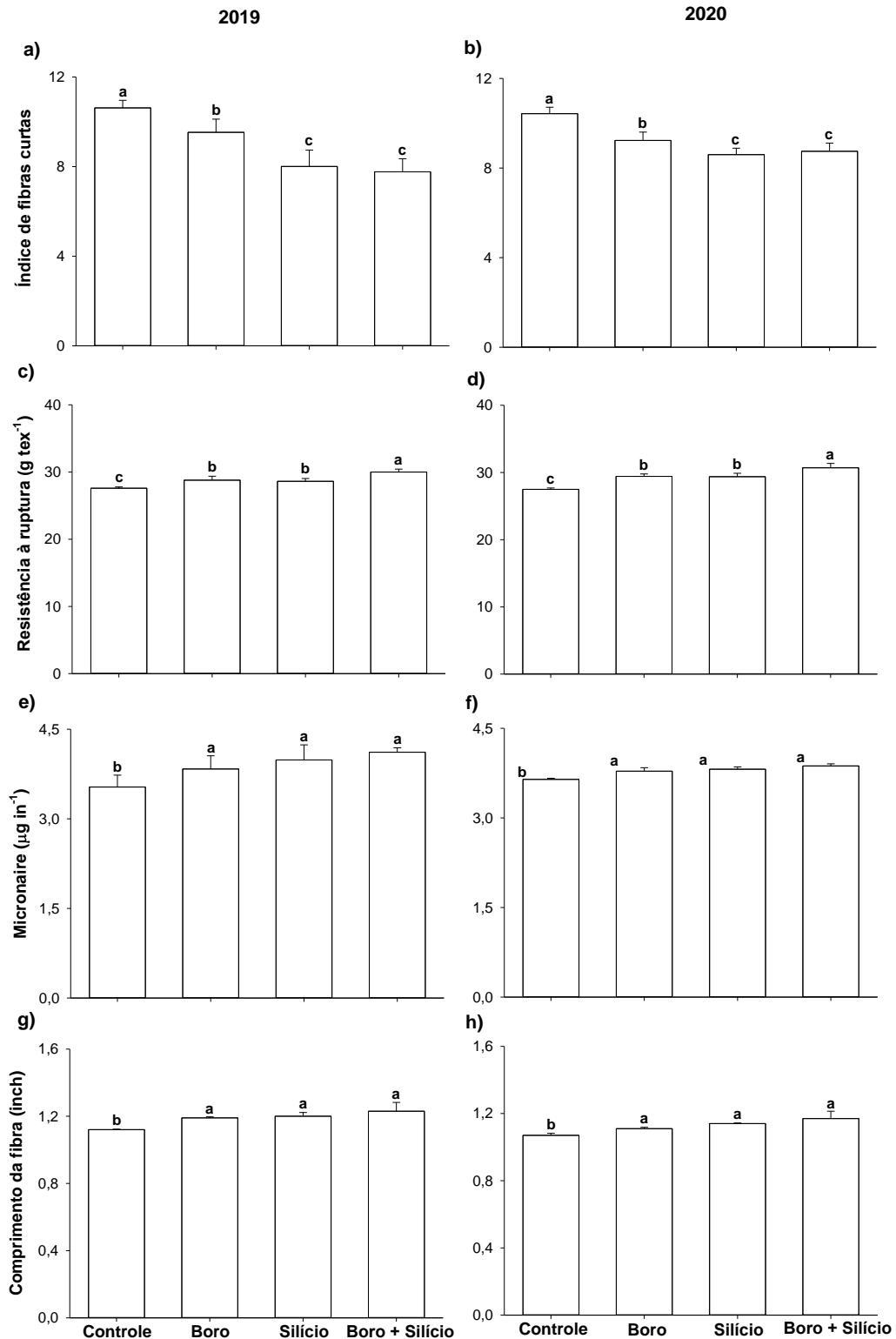


Figura 8. Índice de fibras curtas (a, b), resistência à ruptura (c, d), micronaire (e, f) e comprimento da fibra (g, h) de plantas de algodão cultivadas em solo deficiente em boro em Chapadão do Sul -MS, Brasil em 2019 e em 2020 em função de diferentes aplicações foliares.

Nos experimentos, ficaram evidenciados que o efeito benéfico da aplicação do Si, isolado ou associado ao B, no incremento da produtividade do algodoeiro pode ser atribuído ao incremento da concentração interna de CO₂ (Figura 6a), da taxa fotossintética (Figura 6b) e da eficiência do uso da água (Figura 6c). Atrela-se a isso, à conjuntura que, o Si pode ter favorecido atributos reprodutivos do algodão que, por sua vez, incrementam o aumento da produtividade. Nas estruturas reprodutivas, o Si pode contribuir com o B na formação estrutural dos tubos polínicos, uma vez que este elemento benéfico é destacado como um dos componentes presentes na estrutura da parede celular dos grãos de pólen (Crang e May, 1974).

Os benefícios do fornecimento de B via foliar, aumentando a qualidade da fibra em algodoeiro é pouco relatada na literatura (Ahmad et al., 2009). A deficiência de B está relacionada à redução no teor de lignina, pectina, celulose e hemicelulose na fibra do algodão (Zhao e Oosterhuis, 2002; O'Neill et al., 2004; Oliveira et al., 2006), podendo afetar a qualidade da fibra. A eficiência do fornecimento foliar de B em incrementar o teor do micronutriente nas folhas e nas plumas do algodão (Figura 5a, b, c, d), e, conseqüentemente, o valor da resistência à ruptura (Figura 8b, c), do micronaire (Figura 7e, f), do comprimento da fibra (Figura 7g, h), e em reduzir o índice de fibras curtas (Figura 7a, b).

O Si também pode ser importante na formação da fibra de algodão, por formar complexo com pectinas, caloses, taninos e amidos (Boylston et al., 1990), pois, a concentração deste elemento é alta durante a fase de alongamento da fibra de algodão (aproximadamente, do 1° ao d 21° dia, após a antese) (Boylston, 1988). Estudos recentes demonstram que, o acúmulo de Si nas fibras é geneticamente controlado (Collin et al., 2012) e, após absorvido, o Si pode formar ligações mistas com (1;3, 1;4)- β -D-glucano, aumentando a resistência física da parede celular (Kido et al., 2015). A aplicação de Si para tratamento da fibra é comumente utilizada pela indústria têxtil, a partir do uso de silane, siloxane ou dióxidos de Si, que são compostos inorgânicos, com a finalidade de incrementar a resistência da fibra à tração e à estabilidade térmica de fibras naturais (Siengchin e Dangtungee, 2014; Orue et al, 2016), tendo em vista ligações Si-O-Si e Si-O-C, que se formam na superfície da celulose (Lu et al., 2013). Luyckx et al. (2017), em estudo de revisão

ressalta perspectivas tecnológicas promissoras, a partir do tratamento com Si na planta, durante o desenvolvimento da fibra, e não apenas *in vitro*, em fibras maduras.

A pesquisa permitiu aceitar a hipótese que o Si fornecido via foliar na fase reprodutiva do algodoeiro tem efeito semelhante ao B na produtividade (Figura 7) e na qualidade da fibra (Figura 8). Incorpora-se a isso, um outro achado que a associação do B e Si, em relação à sua aplicação isolada amplia a qualidade da fibra do algodoeiro ao incrementar a resistência à ruptura (Figura 8c, d) e diminuir o índice de fibra curta (Figura 8a, b).

4. CONCLUSÃO

A aplicação foliar de B e Si, isolados, na fase reprodutiva do algodoeiro têm efeito semelhante nas trocas gasosas, produtividade e qualidade da fibra. A aplicação da mistura B+Si apresenta efeito somatório incrementando a resistência a ruptura e diminuindo o índice de fibras curtas na fibra do algodoeiro.

5. REFERÊNCIAS

- Ahmad S, Akhtar LH, Iqbal N, Nasim M (2009) Short communication cotton (*Gossypium hirsutum* L.) varieties responded differently to foliar applied boron in terms of quality and yield. **Soil Environment** 28:88-92.
- Ahmed N, Abid M, Rashid A, Ali MA, Ammanullah M (2013) Boron requirement of irrigated cotton in a typic Haplocambid for optimum productivity and seed composition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 44:1293–1309.
- Ahmed N, Ali MA, Hussain S, Hassan W, Ahmad F, Danish S (2020) Essential micronutrients for cotton production. In.: Ahad S, Hasanuzzaman M (Eds.) **Cotton production and uses**. Singapura: Springer, p. 105–117.
- Atique-Ur-Rehman QR, Hussain A, Sardar H, Sarwar N, Javeed HMR, Maqbool A, Hussain M (2020) Soil applied boron (B) improves growth, yield and fiber quality traits of cotton grown on calcareous saline soil. **Plos One** 15:e0231805.
- Barros TC, Prado RM, Roque CG, Arf MV, Vilela RG (2019) Silicon and salicylic acid in the physiology and yield of cotton. **Journal of Plant Nutrition** 42:458–465.
- Bataglia OC, Teixeira JP, Furlani PR, Furlani AM, Gallo JR (1978) Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 31p.

- Birchall JD (1995) The essentiality of silicon in biology. **Chemical Society Reviews** 24:351–357.
- Boylston EK (1988) Presence of silicon in developing cotton fibers. **Journal of Plant Nutrition** 11:1739–1747.
- Boylston EK, Hebert JJ, Hensarling TP, Bradow JM, Thibodeaux DP (1990) Role of silicon in developing cotton fibers. **Journal of Plant Nutrition** 13:131–148.
- Collin B, Doelsch E, Keller C, Panfili F, Meunier JD (2012) Distribution and variability of silicon, copper and zinc in different bamboo species. **Plant and Soil**, 351:377–387
- Crang RE, May G (1974) Evidence for silicon as a prevalent elemental component in pollen wall structure. **Canadian Journal of Botany** 52:2171–2174.
- Dell B, Huang L (1997) Physiological response of plants to low boron. **Plant and Soil** 193:103–120.
- Ferreira DF (2014) Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciencia e Agrotecnologia** 38:109–112.
- Flores RA, Arruda EM, Souza Junior JP, Prado RM, Santos ACA, Aragão AS, Pedreira NG, Costa CF (2019) Nutrition and production of *Helianthus annuus* in a function of application of leaf silicon. **Journal of Plant Nutrition** 42:137–144.
- Fonseca RG, Santana JC (2002) Resultados de ensaio HVI e suas interpretações (ASTM D-4605) [HVI test results and their interpretations (ASTM D-4605)]. Campina Grande: Embrapa Algodão, 13p.
- Görmüs Ö (2005) Interactive effect of nitrogen and boron on cotton yield and fiber quality. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry** 29:51–59.
- Haynes RJ (2019) What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils? **Geoderma** 337:375–383.
- Howard DD, Essington ME, Gwathmey CO, Percell WM (2000) Buffering of foliar potassium and boron solutions for no-tillage cotton production. **Journal of Cotton Science**, 4:237–244.
- Howard DD, Gwathmey CO, Sams CE (1980) Foliar feeding of cotton: evaluating potassium sources, potassium solution buffering, and boron. **Agronomy Journal** 90: 740–746.
- Javaid T, Farooq MA, Akhtar J, Saqib ZA, Anwar-Ul-Haq M (2019) Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na⁺, Cl⁻ and mineral ions. **Plant Physiology and Biochemistry** 141:291–299.

- Kido N, Yokoyama R, Yamamoto T, Furukawa J, Iwai H, Satoh S, Nishitani K (2015) The matrix polysaccharide (1;3,1;4)-2-d-glucan is involved in silicon-dependent strengthening of rice cell wall. **Plant and Cell Physiology** 56:268–276.
- Kim SG, Kim KW, Park EW, Choi D (2002) Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. **Phytopathology** 92:1095–1103.
- Kondörfer GH, Pereira HS, Nola A (2004) Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 18p.
- Kubicki JD, Heaney PJ (2003) Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 67:4113–4121.
- Kumar S, Adiram-Filiba N, Blum S, Sanchez-Lopez JA, Tzfadia O, Omid A, Volpin H, Heifetz Y, Goobes G, Elbaum R (2019) Siliplant1 (Slp1) protein precipitates silica in sorghum silica cells. **Journal of Experimental Botany** 71:6830–6843.
- Kumar S, Kumar D, Sekhon KS, Choudhary OP (2018) Influence of levels and methods of boron application on the yield and uptake of boron by cotton in a calcareous soil of Punjab. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 49: 499–514.
- Kumar S, Milstein Y, Bрами Y, Elbaum M, Elbaum R (2017) Mechanism of silica deposition in sorghum silica cells. **New Phytologist** 213:791–798.
- Leonard A, Holloway B, Guo M, Rupe M, Yu G, Beatty M, Zastrow-Hayes G, Meeley R, Llaca V, Butler K, Stefani T, Jaqueth J, Li B (2014) Tassel-less1 encodes a boron channel protein required for inflorescence development in maize. **Plant and Cell Physiology** 55:1044–1054.
- Li M, Zhao Z, Zhang Z, Zhang W, Zhou J, Xu F, Liu X (2017) Effect of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Scientific Reports** 7: 1–9.
- Lu T, Jiang M, Jiang Z, Hui D, Wang Z, Zhou Z (2013) Effect of surface modification of bamboo cellulose fibers on mechanical properties of cellulose/epoxy composites. **Composites Part B: Engineering** 51:28–34.
- Luyckx M, Hausman JF, Lutts S, Guerriero G (2017) Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives. **Frontiers in Plant Science** 8:e411.
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira AS (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos, 319p.

Moraes DHM, Mesquita M, Bueno AM, Flores RA, Oliveira HFE, Lima FSR, Prado RM, Battisti R (2020) Combined effects of induced water deficit and foliar application of silicon on the gas exchange of tomatoes for processing. **Agronomy** 10:e1715.

O'Neill MA, Ishii T, Albersheim P, Darvill AG (2004) RHAMNOGALACTURONAN II: Structure and function of a borate cross-linked cell wall pectic polysaccharide. **Annual Review of Plant Biology** 55:109–139.

Oliveira KR, Souza Junior JP, Bennett SJ, Checchio MV, Alves RC, Felisberto G, Prado RM, Gratão PL (2020) Exogenous silicon and salicylic acid applications improve tolerance to boron toxicity in field pea cultivars by intensifying antioxidant defence systems. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 201:e110778.

Oliveira RH, Milanez CRD, Dallaqua MAM, Rosolem CA (2006) Boron deficiency inhibits petiole and peduncle cell development and reduces growth of cotton. **Journal of Plant Nutrition** 29:2035–2048.

Oosterhuis DM, Zhao D (2001) Effect of boron deficiency on the growth and carbohydrate metabolism of cotton. In: Horts WJ, Schenk MK, Bürkert A, Claassen N, Flessa H, Frommer B, Goldbach H, Olf HW, Römheld V, Sattelmacher B, Schmidhalter U, Schuvert S, Wirém NV, Wittenmayer L (EDs) **Plant Nutrition**. Dordrecht: Springer, p.166–167.

Orue A, Jauregi A, Unsuain U, Labidi J, Eceiza A, Arbelaz A (2016) The effect of alkaline and silane treatments on mechanical properties and breakage of sisal fibers and poly(lactic acid)/sisal fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing** 84:186–195.

Polster J, Schwenk M, Bengsch E (1978) The role of boron, silicon and nucleic bases on pollen tube growth of *lilium longiflorum* (L.). **Zeitschrift fur Naturforschung - Section C Journal of Biosciences** 47:102–108.

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

Raij, B. Van Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 2001.

Raven JA (1983) The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews** 58:179–207.

Santos HG, Jacomine PK, Anjos LH, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Araújo Filho JC, Oliveria JB, Cunha TJ (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Solos, 355p.

Siengchin S, Dangtungee R (2014) Polyethylene and polypropylene hybrid composites based on nano silicon dioxide and different flax structures. **Journal of Thermoplastic Composite Materials** 27:1428–1447.

Souza Junior JP, Prado RM, Sarah MMS, Felisberto G (2019) Silicon mitigates boron deficiency and toxicity in cotton cultivated in nutrient solution. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 182:805–814.

Souza Junior JP, Prado RM, Soares MB, Silva JLF, Guedes VHF, Sarah MMS, Cazetta JO (2020) Effect of different foliar silicon sources on cotton plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:95-103.

Vandegeer RK, Zhao C, Stewart XC, Wuhrer R, Hall CR, Hartley SE, Tissue DT, Johnson SN (2020) Silicon deposition on guard cells increases stomatal sensitivity as mediated by K⁺ efflux and consequently reduces stomatal conductance. **Physiologia Plantarum** 171:358-370.

Wahid MA, Saleem M, Irshad S, Khan S, Cheema MA, Saleem MF, Tung AS (2020) Foliar feeding of boron improves the productivity of cotton cultivars with enhanced boll retention percentage. **Journal of Plant Nutrition** 43:2411–2424.

Will S, Eichert T, Fernandez V, Möhring J, Müllher T, R*omheld V (2011) Absorption and mobility of foliar-applied boron in soybean as affected by plant boron status and application as a polyol complex. **Plant and Soil** 344:283–293.

Zhao D, Oosterhuis DM (2002) Cotton carbon exchange, nonstructural carbohydrates, and boron distribution in tissues during development of boron deficiency. **Field Crops Research** 78:75–87.

Zhao D, Oosterhuis DM (2003) Cotton growth and physiological responses to boron deficiency. **Journal of Plant Nutrition** 26:855–867.

Zhuravlev LT (2000) The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 173:1–38.

CAPÍTULO 5 – Considerações finais

Existem muitos relatos de prejuízo na produção do algodoeiro por deficiência de boro (B) pois é uma das culturas anuais mais sensível a essa deficiência. Neste cenário tem sido muito utilizado a adubação boratada na cultura nas diferentes regiões de cultivo predominando a adubação foliar. No entanto, o uso indiscriminado da aplicação foliar, utilizando calda com alta concentração do micronutriente, promove a fitotoxicidade na cultura, causando perdas irreversíveis. Diante disso, haviam dois problemas nutricionais na cultura do algodão: a deficiência e a toxicidade de boro.

Neste contexto existia relatos que o silício (Si) sendo um elemento multi-estresse poderia mitigar os efeitos dos danos nutricionais de B no cultivo do algodão. Para estudar essas desordens nutricionais deste micronutriente com alto rigor científico tendo alto controle do meio de cultivo era necessário iniciar os estudos em hidroponia. Observamos inicialmente pouca pesquisa sobre as concentrações de B na solução nutritiva que pudesse indicar com segurança as concentrações crítica deste micronutriente na solução nutritiva. Diante disso, em 2018, realizou-se uma pesquisa que constituiu a dissertação apresentado à UNESP para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), para definir o nível crítico de B (deficiência e toxicidade) na solução nutritiva para algodoeiro. Em adição verificou-se haver efeito benéfico do silício (Si) como agente mitigador da deficiência e da toxicidade de B em plantas de algodão (Souza Junior et al., 2019) (<https://doi.org/10.1002/jpln.201800398>).

Os resultados promissores fizeram surgir questionamento importante, se a aplicação foliar de boro associado ao silício poderia ampliar os seus efeitos benéficos para atenuar os efeitos deletérios da deficiência ou da toxicidade de B na cultura do algodão a partir da inclusão do Si à calda de pulverização.

Para isto foi necessário haver compatibilidade química destes elementos em solução devendo se considerar o risco de polimerização do Si em solução aquosa pois ele é muito reativo. Nesse sentido, inicialmente foi dispendido quatro meses para testes laboratoriais a fim de definir concentração ideal de B e de Si que não

ocorra polimerização, indicada, posteriormente, pelo teste de turbidez e pelos registros fotográficos.

Esta pesquisa comprovou a validade de tais questionamentos, surgindo uma implicação agrônômica relevante, referente à pulverização foliar boratada do algodoeiro. Os resultados da pesquisa permitem indicar a pulverização foliar do algodoeiro com quatro aplicações iniciando em B1 (primeiro botão floral no primeiro ramo reprodutivo) que tenha a inclusão do Si na concentração de $1,15 \text{ g L}^{-1}$ ou de B na concentração de $1,5 \text{ g L}^{-1}$ isolados, e que a sua associação potencializa os benefícios para a cultura.

Uma outra implicação importante é que os estudos realizados pelo Genplant com pulverizações foliares de Si na cultura do algodão em condição de campo indicaram excelentes respostas da cultura devido ao aumento da produtividade (Barros et al., 2019) (<https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1567765>). Estes benefícios do Si eram atribuídos apenas a melhoria dos aspectos fisiológicos da cultura. Portanto, é possível que essa melhoria na produtividade deve ter recebido também contribuição no maior desenvolvimento reprodutivo da planta ignorado nestas pesquisas.

Este estudo ratificou também a importância do B aplicado por intermédio foliar no algodoeiro, em particular, para diminuir estresse oxidativo nas folhas e aumentar a produção e viabilidade de grãos de pólen, atingindo elevada produtividade e com fibra de alta qualidade.

A perspectiva da aplicação foliar de B associada ao Si no algodoeiro é promissora, pois, permitirá produção com qualidade da fibra diferenciada, fator importante para agregar valor ao produto, melhorando a rentabilidade da cultura. A perspectiva destes resultados tem implicação global, posto que, existem muitas áreas cultivadas com algodoeiro em solos com baixo teor de B, especialmente, de textura mais arenosa e com baixo teor de matéria orgânica, aumentando o potencial de resposta da planta à aplicação foliar de B e Si.

Uma outra perspectiva que surge, diz respeito às novas pesquisas envolvendo o emprego do B e Si em outras cultivares de algodão e/ou em diferentes condições edafoclimáticas, notadamente, pelo fato que, este estudo definiu as concentrações de B e Si e de estabilizantes ideais à mistura desses elementos para

utilizar na calda de pulverização. Em adição, novos estudos necessitam ser realizados para compreensão dos mecanismos que ocorrem na flor durante a produção e viabilidade de grãos de pólen, que foram incrementados pela aplicação de B, de Si e de B associado a Si.