

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

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DE DEFICIÊNCIA E
TOXICIDADE DE BORO NA CULTURA DO ALGODÃO
CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Jonas Pereira de Souza Júnior

Engenheiro Agrônomo

2018

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

**SILÍCIO COMO MITIGADOR DE DEFICIÊNCIA E
TOXICIDADE DE BORO NA CULTURA DO ALGODÃO
CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Jonas Pereira de Souza Júnior

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientadores: Prof. Dr. Cassiano Garcia Roque

Profa. Dra. Rita de Cássia Félix Alvarez

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

2018

Souza Júnior, Jonas Pereira de
S729s Silício como mitigador de deficiência e toxicidade de boro na cultura do algodão cultivado em solução nutritiva. – – Jaboticabal, 2017
ii, 62 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018
Orientador: Renato de Mello Prado
Banca examinadora: Rilner Alves Flores, Jairo Oswaldo Cazetta
Bibliografia

1. Elemento benéfico. 2.Desordem nutricional. 3. Micronutriente.
I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.811:633.51

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
– Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

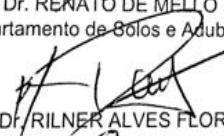
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SILÍCIO COMO MITIGADOR DE DEFICIÊNCIA E TOXICIDADE DE BORO
NA CULTURA DO ALGODÃO CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA

AUTOR: JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO
COORIENTADOR: CASSIANO GARCIA ROQUE
COORIENTADORA: RITA DE CASSIA FELIX ALVAREZ

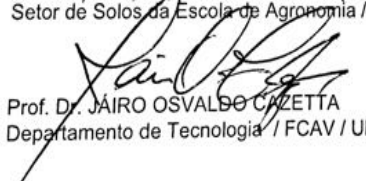
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA
DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal



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



Prof. Dr. JAÍRO OSVALDO CEZETTA
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 26 de fevereiro de 2018

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, e graduação em Engenharia Agrônoma (2015) pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) Câmpus de Jaboticabal. Em 2010, ingressou no Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da FCAV/UNESP (Genplant), realizando pesquisas relacionadas à ciclagem de nutrientes, adubação com micronutrientes e adubação potássica da cana-de-açúcar em sistemas de colheita mecanizada. Foi bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, 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 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 seis meses de estudo da língua inglesa na Universidade La Trobe – Vic - Austrália. Em 2014, foi bolsista da CAPES programa “Ciência sem Fronteira”, em graduação sandwiche Brasil – Austrália, na Universidade La Trobe. Atualmente, é mestrando 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.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito, nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota”.

Theodore Roosevelt

Aos meus pais Jonas Pereira de Souza 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

A Deus e Nossa Senhora de Aparecida, por estarem comigo em todos os momentos de minha vida, sempre abençoando meu caminho com oportunidades.

Ao meu pai Jonas Pereira de Souza, minha mãe Ilda Raimunda e minha irmã Yara Luana Pereira de Souza, por apoiarem a realização deste sonho, vivenciando cada passo, compartilhando as dificuldades e as alegrias, sempre com muito amor, respeito e admiração.

À minha tia Cleuza do Nascimento e minha madrinha Maria Aparecida Bibó, por serem como mães para mim e sempre me incentivarem acreditando em meu potencial.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado, por toda paciência, dedicação e oportunidades dadas nestes anos de trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, pela oportunidade de realização deste trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos através do programa de pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo).

À técnica do laboratório do Departamento de Solos e Adubos, Cláudia Campos Dela Marta, por todo apoio, conselhos, ensinamentos, conversas e bons momentos passados.

Aos meus amigos Bianca, Gabriela, Lara, Leonardo, Luan e Victor, por estarem comigo em todos os momentos importantes de minha vida, sempre compartilhando sorrisos nas alegrias e apoio nas dificuldades.

Ao meu namorado Leandro, pela paciência, apoio e companheirismo, sempre deixando claro que estará presente em todos os momentos de minha vida.

Aos meus amigos Gustavo e Camila, por compartilharmos toda esta jornada da pós-graduação e sempre podermos encontrar apoio um no outro.

Aos meus amigos Marcilene, Gelza e Guilherme, por todo apoio na execução deste trabalho.

A todos os que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Página

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1. Introdução.....	1
2. Revisão de literatura.....	3
2.1 O boro no algodoeiro	3
2.2 Silício como mitigador de estresse abiótico	7
2.3 Silício foliar no algodoeiro.....	9
3. Referências	11
CAPÍTULO 2 – Fontes alternativas de silício foliar no desenvolvimento de algodão sob altas temperaturas	17
Resumo	17
Introdução.....	18
Material e Métodos	19
Resultados e Discussão	22
Conclusão.....	26
Referências	26
CAPÍTULO 3 – Nível crítico de deficiência e toxicidade de boro na solução nutritiva cultivada com plantas de algodão	29
Resumo	29
Introdução.....	30
Material e Métodos	31
Resultados e Discussão	33
Conclusão.....	39
Referências	39
CAPÍTULO 4 – Silício via foliar e radicular em plantas de algodão sob diferentes estados nutricionais de boro	42
Resumo	42
Introdução.....	43
Material e Métodos	44
Resultados e Discussão	46
Conclusão.....	57
Referências	57

SILÍCIO COMO MITIGADOR DE DEFICIÊNCIA E TOXICIDADE DE BORO NA CULTURA DO ALGODÃO CULTIVADO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA

RESUMO - A deficiência de boro é um fator limitante na produção do algodoeiro, mas o excesso pode induzir à toxicidade. Nas duas desordens nutricionais de boro, o acréscimo de silício, via foliar ou radicular, pode aliviar esses efeitos, mas essas informações não são conhecidas nas plantas de algodão. Objetivou-se (a) inicialmente, verificar a fonte e a concentração de Si aplicada via foliar que resulta em maior acúmulo do elemento nas plantas de algodão; (b) definir a concentração crítica do boro na solução nutritiva que induz à deficiência e à toxicidade do micronutriente nas plantas de algodão, e (c) verificar o efeito do silício, aplicado via foliar e radicular, como agente mitigador dos efeitos deletérios da deficiência e da toxicidade de boro no algodoeiro. Foram desenvolvidos três experimentos em plantas de algodão transgênico cultivados em sistema semi-hidropônico em casa de vegetação. O primeiro experimento foi com concentrações de Si via foliar em diferentes fontes do elemento. O segundo experimento foi com concentrações de B na solução nutritiva. Com os resultados destes experimentos, obtiveram-se a concentração foliar de Si e a fonte mais adequada, e a concentração de B na solução nutritiva, que induz a suficiência, deficiência e toxicidade. Diante destes resultados, realizou-se o terceiro experimento, onde foram avaliados Si aplicado via foliar e radicular, e o controle (sem Si) em plantas de algodão sob deficiência, suficiência e toxicidade de B. A aplicação foliar de Si é viável agronomicamente para o algodoeiro, pois incrementou o acúmulo de Si, o teor de clorofila e a eficiência quântica do fotossistema II, favorecendo a produção de matéria seca, destacando-se o Si aplicado na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbiol, na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$ de Si. O nível crítico de B na solução nutritiva por deficiência e toxicidade, associado à diminuição de 25% da produção de massa seca de plantas de algodão, foi $33,7$ e $130,5 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ de B, respectivamente. O silício mitiga desordem nutricional de boro em algodoeiro, destacando aplicação foliar e radicular para aliviar os efeitos deletérios de deficiência e toxicidade de B, respectivamente.

Palavras-chave: adubação foliar, desordem nutricional, *Gossypium hirsutum* L., elemento benéfico, micronutriente, nutrição boratada.

SILICON AS A DEFICIENCY MITIGATOR AND BORON TOXICITY IN THE CULTURE OF COTTON CULTIVATED IN NUTRITIVE SOLUTION

ABSTRACT - Boron deficiency is a limiting factor for cotton production, but boron excess may induce toxicity. In the two nutritional disorders of boron, the addition of silicon by leaf or root application can alleviate these effects but this information is unknown in cotton plants. The objective of this study was to (a) initially verify the source and concentration of Si applied in the leaf that results in greater accumulation of the element in the cotton plants; (b) define the critical concentration of boron in the nutrient solution that induces the deficiency and toxicity of the micronutrient, and (c) to verify the effect of silicon, applied by leaf and root, as a mitigating agent of the deleterious effects of boron deficiency and toxicity in cotton. Three experiments were carried out on cotton plants cultivated in a soilless growing system. The first experiment was with concentrations of Si by leaf application with different sources of the element. The second experiment was with concentrations of B in the nutrient solution. With the results of these experiments, we got the more adequate Si foliar source and concentration; and the concentration of B in nutrition solution that induces to sufficiency, deficiency and toxicity. The third experiment was done to verify the effects of apply silicon by leaf and root and control (without Si) in cotton plants under deficiency, sufficiency and toxicity of B. The application of Si is viable for cotton, since it increased the accumulation of Si, the chlorophyll content and the quantum efficiency of the photosystem II, favoring the dry matter production, emphasizing Si applied in the form of sodium and potassium silicate stabilized with sorbitol at the concentration of 0,8 g L⁻¹ of Si. The critical level of B in the nutrient solution due to deficiency and toxicity, associated with a 25% decrease in dry matter yield of cotton plants, was 33.7 and 130.5 µmol L⁻¹ of B, respectively. Silicon mitigates nutritional disorder of boron in cotton highlighting leaf and root application to alleviate the deleterious effects of B deficiency and toxicity, respectively.

Key words: foliar fertilization, nutritional disorder, *Gossypium hirsutum* L., beneficial element, micronutrient, borated nutrition.

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. Introdução

A deficiência de boro (B) causa prejuízo importante na produção do algodoeiro (BOGIANI; ROSOLEM, 2012; AHMED et al., 2013; BOGIANI et al., 2014), indicando alta resposta da cultura à fertilização boratada (BELLALOU; TURLEY; STETINA, 2015).

A diferença entre a dose adequada e o excesso de B é pequena, sendo possível verificar efeito tóxico deste elemento na cultura do algodão, quando cultivado em altas concentrações do micronutriente (AHMED et al., 2013). No entanto, existem relatos que indicam maior tolerância das plantas de algodão à toxicidade de B (BAÑUELOS et al., 1999), podendo ter concentrações críticas do elemento na solução nutritiva mais larga, entre a deficiência e a toxicidade.

Os estudos sobre a concentração crítica de B na solução nutritiva referente à deficiência e à toxicidade em plantas de algodão são restritos, havendo a necessidade de mais estudos.

Em caso de estresse por desordem nutricional do B, tem-se a opção da mitigação a partir da aplicação de elementos benéficos como o silício (Si), que pode ser promissor. Isto ocorre pelo fato de que o Si é considerado elemento benéfico que melhora o crescimento das plantas, especialmente sob estresse biótico ou abiótico.

No entanto, o papel do Si em aliviar os efeitos deletérios da deficiência e da toxicidade de B ainda é pouco conhecido na cultura do algodão.

Os estudos com Si na cultura do algodão são escassos e restritos em plantas sem desordem nutricional por B, que indicam efeito benéfico do elemento aplicado via radicular, aumentando o teor de clorofila (FAROOQ et al., 2013) e, aplicado via foliar, aumentando a eficiência quântica do fotossistema II e diminuindo a fluorescência inicial e máxima (SOUZA FERRAZ et al., 2017).

Para o fornecimento do Si às plantas, que é absorvido na forma de ácido monossilícico (EPSTEIN; BLOOM, 2006), tem-se a opção da aplicação via radicular (solo ou cultivo hidropônico) e via foliar. A aplicação de Si no solo para as culturas

tem sido realizada em grandes quantidades devido á fonte silicato de cálcio ter baixa solubilidade, necessitando de incorporação no solo. No solo, pode reagir, formando polímeros e diminuindo a absorção pelas plantas (CARVALHO et al., 2009). Portanto, a aplicação de Si no solo tem elevadas “perdas”, exigindo alta quantidade, aumentando o custo da silicatagem e, ainda, não sendo bem aproveitado devido à baixa absorção do elemento por plantas não acumuladoras.

O algodoeiro é classificado como planta intermediária quanto à absorção de Si (MA; TAKAHASHI, 2002; HODSON et al., 2005), apresentando absorção radicular mais lenta, quando comparada à velocidade de absorção de água (ADATIA; BESFORD, 1986; MA; YAMAJI, 2006).

O fornecimento de Si via foliar pode ser uma alternativa à aplicação radicular por favorecer sua absorção por plantas não acumuladoras (CRUSCIOL et al., 2013) e mesmo por intermediárias.

No entanto, para aplicação foliar de Si, tem-se utilizado exclusivamente o silicato de potássio, seja em culturas em geral como também no algodão (FARIAS, 2012). Entretanto, novas fontes de Si têm surgido, que precisam ser avaliadas, como a nanossílica e outras fontes, como o ácido monossilícico estabilizado com PEG400 e o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol.

Diante da falta de informações sobre aspectos básicos do Si em algodoeiro, em relação a sua eficiência fornecido via foliar e a resposta da planta ao B via radicular, e, principalmente, a relação do Si e a desordem nutricional de B, é pertinente testar as hipóteses: (a) a maior eficiência da aplicação foliar de Si é dependente da fonte e da concentração do elemento na calda de aplicação; (b) a concentração crítica de B na solução nutritiva para induzir deficiência e toxicidade é relativamente larga, e ainda (c) o aumento da absorção foliar de Si pode favorecer aspectos básicos da fisiologia, resultando em aumento da produção de matéria seca do algodoeiro cultivado em condição de desordem nutricional, seja por toxicidade, seja por deficiência de boro.

Neste estudo, objetivou-se: (a) verificar a fonte e a concentração de Si aplicado via foliar que resulta em maior acúmulo e produção de matéria seca das plantas de algodão; (b) determinar os níveis críticos de deficiência e de toxicidade de boro para a cultura do algodão, e (c) verificar o efeito do silício aplicado, via foliar

e radicular, em mitigar os efeitos deletérios da deficiência e toxicidade de boro no algodoeiro.

2. Revisão de literatura

2.1. O boro no algodoeiro

O teor de B nos solos é baixo, limitando a produção agrícola devido ao baixo teor de matéria orgânica, fonte do elemento em solos tropicais; associado a isto, o micronutriente tem alta mobilidade no solo, podendo estar na forma de ácido bórico, facilmente perdido por lixiviação (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

O boro é absorvido pelas plantas via sistema radicular, na forma de ácido bórico, por diferentes mecanismos moleculares, dependendo da disponibilidade de B. Em alta disponibilidade de B, a absorção pode ocorrer por difusão passiva através das camadas duplas de lipídeos (BROWN et al., 2002); enquanto em baixa disponibilidade a absorção ocorre de forma ativa, sendo dependente de transportadores específicos (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

A redistribuição do B é limitada em muitas espécies vegetais, assim os sintomas de deficiência e de toxicidade ocorrem em partes jovens e maduras das plantas, respectivamente (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

Em algodoeiro, existem relatos de prejuízos na produção por deficiência de B (BOGIANI; ROSOLEM, 2012; AHMED et al., 2013; BOGIANI et al., 2014), indicando que as plantas de algodão podem ser responsivas à adubação boratada (BELLALLOUI; TURLEY; STETINA, 2015).

A importância do micronutriente na produção das plantas deve-se a seu papel biológico no metabolismo de ácidos nucleicos, atuando na síntese de uracil, no metabolismo de carboidratos, proteínas, ácido indolacético e no metabolismo de fenóis, bem como na síntese da parede celular, na estrutura da parede celular, na integridade e na funcionalidade da membrana plasmática, além de importante papel no transporte de açúcares (MENGEL; KIRKBY, 1978; LOOMIS; DURST, 1992; MARSCHNER; MARSCHNER, 1995; GOLDBACH, 1997; BROWN et al., 1999; GOLDBACH et al., 2001).

A nível molecular, estudos demonstram importância do B na ligação da pectina, presente na parede celular, a qual é essencial para o desenvolvimento foliar (TANAKA; FUJIWARA, 2008). As pectinas são importantes componentes celulares das plantas formadas por polissacarídeos incluindo as homogalacturonas e as rhamnogalacturonas I e II (RG-I e RG-II) (KOBAYASHI; MATOH; AZUMA, 1996; MIWA et al., 2013). A síntese de RG-II é reticulada por um diéster de borato-diol 1:2, o qual forma o RG-II dimérico, e em uma posterior ligação cruzada com o borato, o RG-II é sintetizado por uma rede tridimensional pecticística estável (TANAKA; FUJIWARA, 2008).

Quando em deficiência de B, o desenvolvimento das plantas é prejudicado, podendo não ocorrer o desenvolvimento completo do ciclo vegetativo em condições severas de deficiência. Os sintomas de deficiência de boro ocorrem inicialmente nas regiões de crescimento (MARSCHNER; MARSCHNER, 1995), dada baixa redistribuição, indicando a importância de se garantir suprimento contínuo de B para as plantas (DELL; HUANG, 1997; SHORROCKS, 1997).

Em condições de deficiência de boro, a expansão foliar e a alongação das raízes são inibidas (MARSCHNER; MARSCHNER, 1995), sendo observados, em raízes de algodoeiro, coloração escura, menor comprimento, engrossamento e alta taxa de emissão de raízes laterais (OLIVEIRA et al., 2006; BOGIANI; ROSOLEM, 2012). Os autores atribuíram estes efeitos ao impedimento da atividade meristemática com um declínio na divisão e na alongação celular, ao acúmulo de compostos fenólicos deletérios à integridade celular (LEE; ARONOFF, 1967; KOUCHI; KUMAZAWA, 1976).

A dominância apical e o desenvolvimento de flores, frutos e sementes também são inibidos quando este micronutriente está em deficiência, reduzindo a produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas (MARSCHNER; MARSCHNER, 1995), como observado em algodão por Anderson e Boswell (1968) e por Silva et al. (1979).

A altura das plantas de algodão cultivadas em deficiência de B também é prejudicada pelo efeito deletério desta desordem nutricional na síntese de RNA e na síntese proteica, que é um dos processos mais importantes nos tecidos meristemáticos, afetando a divisão e a diferenciação celular, e, por consequência,

o crescimento das partes jovens das plantas (MENGEL; KIRKBY, 1978), sendo o menor desenvolvimento vegetal também explicado pelo papel do boro na estrutura da parede celular (DEMİRAY; DEREBOYLU, 2014).

A nível fisiológico, estudos indicam que a deficiência de B não diminui o teor de clorofila em algodão (DORDAS, 2006; AHMED et al., 2014), indicando que o nutriente não atua diretamente na fotossíntese. No entanto, a deficiência de B pode aumentar o teor de clorofila total por unidade de área foliar das plantas de algodão (OOSTERHUIS; ZHAO, 2001).

O suprimento adequado de boro para a cultura do algodoeiro aumenta o diâmetro caulinar, o desenvolvimento do sistema radicular (ARAÚJO; SILVA, 2012) e a altura das plantas, devido, principalmente, ao efeito deste micronutriente no alongamento celular e na síntese de proteínas, resultando em maior divisão celular (AHMED et al., 2013). O melhor desenvolvimento do sistema radicular favorece a absorção de B, aumentando a eficiência de absorção de boro pelas plantas de algodão (ARAÚJO; SILVA, 2012), pois essa eficiência nutricional indica a capacidade das plantas em absorver nutrientes da solução do solo (PRADO, 2008).

A diferença entre a dose adequada e o excesso de B é pequena, sendo possível verificar efeito tóxico deste elemento na cultura do algodão, quando cultivado em altas concentrações (AHMED et al., 2011). No entanto, a tolerância à toxicidade de B pelas plantas de algodão é questionável, pois há relatos indicando que a cultura é considerada tolerante (BAÑUELOS et al., 1999).

Os mecanismos de tolerância das plantas à toxicidade de boro estão relacionados a vários fatores, como diversidade genética e adaptações fisiológicas, e algumas espécies desenvolveram tolerância a altas concentrações de B devido ao processo de seleção natural exercida por esse elemento em solos ricos em boro (NABLE; BAÑUELO; PAULL, 1997) e mecanismos de exclusão, como acumular menos boro nas folhas e brotos que comparados a plantas não tolerantes (BAÑUELOS et al., 1999), como diminuir a absorção de B pelas raízes e alterar a distribuição e o acúmulo de B na célula, no tecido e nos órgãos (BROWN; HU, 1996), ou secretar boro em excesso na rizosfera na forma de B-quelativado, contribuindo para reduzir o acúmulo de B na planta inteira (NABLE, 1998).

Os sintomas de toxicidade de B iniciam-se nas margens das folhas maduras, ficando cloróticas e podendo evoluir para necrose (YAU et al., 1995). Isto porque o B é transportado em função da taxa de transpiração da folha e acumula-se ao final deste fluxo (YAU et al., 1995).

O excesso de B causa diminuição da altura das plantas de algodão (AHMED et al., 2013), provavelmente devido a distúrbios metabólicos na formação de complexos com NAD^+ dos ribossomos, afetando a formação da estrutura do RNA (LOOMIS; DURST, 1992). Nesta situação de toxicidade, as plantas tendem a diminuir o acúmulo de B, tanto nas raízes, diminuindo a absorção, como na parte aérea, acumulando boro nas folhas velhas e, posteriormente, eliminando as mesmas, como mecanismo de defesa das plantas para não prejudicar áreas metabólicas importantes (NABLE; BAÑUELOS; PAULL, 1997).

Para se alcançar maiores produtividades, busca-se evitar excesso e deficiência nutricional. Os níveis críticos de deficiência de B na solução nutritiva, para o cultivo de plantas de algodão, não estão bem definidos na literatura. Araújo e Silva (2012), em estudos com plantas de algodão em solução nutritiva com diferentes concentrações de boro, verificaram baixo desenvolvimento das plantas em concentrações menores que $10 \mu\text{mol L}^{-1}$ e teor foliar menor que 35 mg kg^{-1} . Os mesmos autores relataram, também, maior desenvolvimento das plantas na faixa de $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ a $80 \mu\text{mol L}^{-1}$ com teor foliar de B de 60 mg kg^{-1} . Entretanto, Bogiani et al. (2014) verificaram desenvolvimento adequado de plantas de algodão na concentração de B na solução nutritiva, entre 13 e $20 \mu\text{mol L}^{-1}$, com teor foliar de 16 mg kg^{-1} .

Portanto, nota-se que as informações sobre as concentrações de B que induzem a deficiência em plantas de algodão são limitadas, e para a toxicidade não são relatadas indicando a necessidade de estudos. O conhecimento preciso das concentrações de B na solução nutritiva faz-se necessário para avançar nos estudos de mitigação destas desordens nutricionais na cultura do algodão.

Neste cenário de possível estresse por desordem nutricional de B, a aplicação de elementos benéficos, como o silício (Si), pode ser promissora quanto à mitigação dos efeitos deletérios ocasionados por deficiência ou por toxicidade do

micronutriente, mesmo em plantas de algodão, classificadas como intermediárias para o acúmulo de Si.

2.2. Silício como mitigador de estresse abiótico

O silício (Si) é considerado elemento benéfico, sendo absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ (EPSTEIN; BLOOM, 2006), podendo aliviar estresses abióticos, como temperaturas elevadas e/ou desordem nutricional boratada.

Em altas temperaturas, a fotossíntese é severamente afetada (SHARKEY; SCHRADER, 2006), pois as plantas apresentam diminuição no metabolismo fotossintético (KÖVES-PÉCHY et al., 1998) e na capacidade e eficiência fotossintética (PERCIVAL, 2005). No aparelho fotossintético, o fotossistema II é o componente da cadeia de transporte de elétrons mais sensível às altas temperaturas (ČAJÁNEK et al., 1998; KALAJI et al., 2016), sendo o complexo de oxigenação o processo fisiológico mais prejudicado (GEORGIEVA et al., 2000), havendo diminuição do fluxo de elétrons transferidos entre a quinona “a” e a quinona “b” (MATHUR et al., 2011).

Avaliando os prejuízos do estresse por alta temperatura e os benefícios do Si nas plantas, é possível inferir que o presente elemento poderia mitigar esse estresse.

Isso pode ocorrer em plantas de algodão, pois com o fornecimento de Si via radicular tem-se aumento no teor de clorofila (FAROOQ et al., 2013), e por via foliar, aumento na EQFSII, diminuindo a fluorescência inicial e a fluorescência máxima, melhorando a estabilidade do fotossistema (SOUZA FERRAZ et al., 2014) com incremento na produção de massa seca, e aliviando os danos causados pela alta temperatura.

O efeito benéfico da aplicação de Si em incrementar a produção de clorofila pode estar associado com o fato de, após absorvido, ser depositado abaixo da cutícula epidérmica e formar uma camada dupla de sílica. Com isso, o Si ocasiona mudanças na arquitetura foliar, mantendo as folhas mais eretas, com melhor

interceptação da luz solar, com consequente maior fotossíntese, a qual infere em maior produção de clorofila a e b (RAVEN, 1983).

Os relatos sobre o papel do Si em aliviar os efeitos deletérios da toxicidade e da deficiência de B na cultura do algodão são incipientes, embora existam relatos em outras culturas.

Um estudo em plantas de espinafre cultivadas sob condição de toxicidade de B verifica que a ação mitigadora do Si aplicado na forma de metassilicato de sódio (Na_2SiO_3) via radicular (GUNES et al., 2007a) está relacionada à capacidade deste elemento benéfico em formar complexos de borossilicato no solo e/ou no interior da planta e, assim, diminuir a absorção pelas raízes e o transporte deste elemento da raiz para a parte aérea.

A ação do Si em diminuir a absorção radicular de boro também foi observada em sorgo (INAL; PILBEAM; GUNES, 2009) e em trigo (GUNES et al., 2007b). Além disso, o Si, irreversivelmente, precipita na raiz, formando $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ na parede celular e no lúmen das células (RICHMOND; SUSSMAN, 2003), reforçando a estrutura celular e conferindo às células maior proteção contra os efeitos deletérios dos estresses abióticos (EPSTEIN; BLOOM, 2006; MA; YAMAJI, 2006).

Existe apenas um relato da relação Si e B em plantas de algodão, mas sem estresse por desordem nutricional do micronutriente, ou seja, com estado nutricional adequado. Neste estudo, a presença de Si, na forma de silicato de sódio em solução nutritiva, diminuiu a absorção e o acúmulo de B na planta (MEHRABANJOUBANI et al., 2015).

O algodoeiro é classificado como planta intermediária quanto à absorção de Si (MA; TAKAHASHI, 2002; HODSON et al., 2005) apresentando teor de Si entre 10 e 50 g kg⁻¹, e absorção mais lenta comparada à velocidade de absorção de água (ADATIA; BESFORD, 1986; MA; YAMAJI, 2006). Quando aplicado via solo, na forma de silicato de sódio, o Si concentra-se na raiz do algodoeiro, na parte externa da epiderme (MEHRABANJOUBANI et al., 2015) e, quando aplicado na forma de SiO_2 -nanoparticulado, mantém-se à superfície das raízes, sendo apenas uma pequena parte transportada para a parte aérea (LE et al., 2014).

O fornecimento do Si via foliar pode ser uma alternativa à aplicação radicular, por evitar a reação do Si na solução do solo e por favorecer a absorção por plantas

não acumuladoras (CRUSCIOL et al., 2013) e intermediárias ao acúmulo de Si, ou seja, apresentam absorção radicular limitada.

2.3. Silício foliar no algodoeiro

Para aplicação foliar de Si, tem-se utilizado exclusivamente o silicato de potássio, seja em culturas em geral, como também no algodão (FARIAS, 2012). Entretanto, novas fontes de Si têm surgido para esta finalidade, como a nanossílica e outras, como o ácido monossilícico estabilizado com PEG400 e o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol.

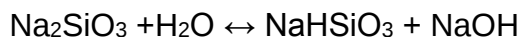
A nanossílica consiste em nanopartículas de óxido de Si (SiO_2) em dispersão coloidal, com dimensões entre 1 e 10 nanômetros (BALL, 2002; ROCO, 2003) e possui características físico-químicas diferentes da do material não nanoparticulado (NEL et al., 2003). A nano- SiO_2 tem-se constituído em um importante nanomaterial utilizado no campo (LE et al., 2014); entretanto, estudos demonstram que a utilização de materiais nanoparticulados pode afetar o desenvolvimento das plantas de algodão de forma positiva ou negativa (MONICA; CREMONINI, 2009). Os efeitos positivos estão relacionados às propriedades hidrofílicas da nano- SiO_2 , a qual permite fácil absorção (SURIYAPRABHA et al., 2012), enquanto o efeito negativo se relaciona a possíveis efeitos fitotóxicos desta fonte (MONICA; CREMONINI, 2009).

As fontes de silicato solúveis estabilizados com alta concentração de ácido monossilícico, ou seja, na forma prontamente absorvida pelas plantas, podem diminuir o gasto das mesmas no processo de absorção (CRUSCIOL et al., 2013). Estas fontes podem ser uma alternativa viável para aumentar a absorção do elemento pelas plantas e resultar em efeito benéfico, mesmo com poucas aplicações durante o ciclo (SORATTO et al., 2012).

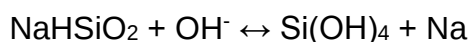
A aplicação foliar de Si pode ser realizada em conjunto com aplicações de rotina na cultura, através de testes de compatibilidade da calda. Segundo Silva (2011), o silicato de sódio, presente nas fontes de Si estabilizado como o ácido monossilícico estabilizado com PEG400 e o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, sofre hidrólise em solução aquosa da seguinte forma:



O mesmo autor verifica ainda que o dissilicato de sódio (Na_2SiO_3) possui menor solubilidade em água, sendo dissociado da seguinte forma:



A concentração dos íons de OH^- aumenta consideravelmente com a diluição do silicato de sódio, ocorrendo a seguinte reação:



Esta reação é dependente do pH, sendo que, em pH 7, tem-se o predomínio da formação de $[\text{Si}(\text{OH})_4]$, forma prontamente disponível para absorção pelas plantas. Em pH elevado, tem-se o predomínio de espécies silicatadas polinucleares (MARINAKIS; SHERGOLD, 1985), e à medida que se diminui o valor pH da solução, tem-se a formação de espécies poliméricas de silício (YANG; ROONASI; HOLMGREN, 2008), que consistem em tetraedros de sílica ligados por pontes de silício-oxigênio-silício (DIETZEL, 2000).

Sendo assim, a aplicação foliar de fontes de silício contendo silicato de sódio em calda, com valor pH 7, teria disponível Si na forma de $\text{Si}(\text{OH})_4$, podendo aumentar a viabilidade agrônômica do elemento benéfico. Isto ocorre porque poderia aumentar o acúmulo deste elemento na parte aérea de plantas intermediárias, como o algodão, minimizando os efeitos deletérios de processos abióticos adversos ao desenvolvimento das culturas como desordem nutricional.

Os estudos sobre a aplicação de Si via foliar em plantas de algodão são incipientes. Entretanto, há relatos sobre o efeito do Si na forma de silicato de potássio aplicado via foliar no aumento da altura, da área foliar e do teor de clorofila de plantas de algodão (FARIAS, 2012). A autora relata, ainda, que em concentrações elevadas, acima de 960 mg L^{-1} de Si, pode ocorrer fitotoxicidade em plantas de algodão, com redução na altura e na área foliar das plantas.

O silicato de potássio aplicado via foliar, em plantas de algodão, também tem incrementado a taxa de assimilação de CO_2 e a eficiência quântica do fotossistema II, e diminuído a fluorescência máxima e inicial (SOUZA FERRAZ et al., 2014). Outro estudo com silicato de potássio aplicado via foliar verificou incremento no desenvolvimento de plantas de algodão, cultivares BRS Rubi e BRS Safira, em

condições do semiárido, atingindo ponto máximo na concentração de 100 mg L⁻¹ de Si (SOUZA FERRAZ et al., 2017).

3. Referencias

ADATIA, M.H.; BESFORD, R. T. The effects of silicone on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of botany**, v.58, n.3, p.343-351, 1986.

AHMED, N.; ABID, M.; AMAD, F.; AMAN ULLAH, M.; JAVAID, Q.; ARIF ALI, M. Impact of boron fertilization on dry matter production and mineral constitution of irrigated cotton. **Pakistan Journal of Botany**, v.43, n.6, p.2.903-2.910, 2011.

AHMED, N.; ABID, M.; RASHID, A.; ABOU-SHANAB, R.; AHMAD, F. Influence of boron nutrition on membrane leakage, chlorophyll content and gas exchange characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Journal of Plant Nutrition**, v.37, n.14, p.2.302-2.315, 2014.

AHMED, N.; ABID, M.; RASHID, A.; ALI, M. A.; AMMANULLAH, M. Boron requirement off irrigated cotton in a typic haplocambid for optimum productivity and seed composition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.44, n.8, p.1.293-1.309, 2013.

ANDERSON, O.E.; BOSWELL, F.C. Boron and manganese effects on cotton yield, lint quality, and earliness of harvest. **Agronomy Journal**, v.60, n.5, p.488-493, 1968.

ARAÚJO, É.O.; SILVA, M.A.C. Interação boro e zinco no crescimento, desenvolvimento e nutrição do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, p.720-727, 2012.

BALL, P. Natural strategies for the molecular engineer. **Nanotechnology**, v.13, n.5, p.R15-R28, 2002.

BAÑUELO, G.S.; AJWA, H.; CÁCERES, L.; DYER, D. Diferencias de acumulación y tolerancia a altas concentraciones de boro de especies agrícolas entre el Norte de Chile y California, Estados Unidos. **Idesia**, v.17, p.31-40, 1999.

BELLALLOUI, N.; TURLEY, R.B.; STETINA, S.R. Water stress and foliar boron application altered cell wall boron and seed nutrition in near-isogenic cotton lines expressing fuzzy and fuzzless seed phenotypes. **Plos Ones**, v.10, n.6, p.e0130759, 2015.

BOGIANI, J.C.; ROSOLEM, C.A. Compared boron uptake and translocation in cotton cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p.1.499-1.506, 2012.

BOGIANI, J.C.; SAMPAIO, T.F.; ABREU-JÚNIOR, C.H.; ROSOLEM, C.A. Boron uptake and translocation in some cotton cultivars. **Plant and Soil**, v.375, n.1-2, p.241-253, 2014.

BROWN, P.; BELLALLOUI, N.; WIMMER, M.; BASSIL, E.S.; RUIZ, J.; HU, H.; PFEFFER, H.; DENNEL, D.; ROMHELD, V. Boron in plant biology. **Plant Biology**, v.4, p.205-223, 2002.

BROWN, P.H.; BELLALLOUI, N.; HU, H.; DANDEKAR, A. Transgenically enhanced sorbitol synthesis facilitates phloem born transport and increases tolerance of tobacco to boron deficiency. **Plant Physiology**, v.119, n.1, p.17-20, 1999.

BROWN, P. H.; HU, H. Phloem mobility of boron is species dependent: evidence for phloem mobility in sorbitol-rich species. **Annals of Botany**, v.77, p.497-505, 1996.

ČAJÁNEK, M.; ŠTROCH, M.; LACHETOVÁ, I.; KALINA, J.; SPUNDA, V. Characterization of the photosystem II inactivation of heat-stressed barley leaves as monitored by the various parameters of chlorophyll a fluorescence and delayed fluorescence. **Journal of Photochemistry and Photobiology b: Biology**, v.47, n.1, p.39-45, 1998.

CARVALHO, M.P.; ZANÃO JÚNIOR, L.A.; GROSSI, J.A.; BARBOSA, J.G. Silício melhora produção e qualidade do girassol ornamental em vaso. **Ciência Rural**, v.39, n.8, p. 2.304-2.399, 2009.

CRUSCIOL, A.C.; SORATTO, R.P.; CASTRO, G.S.A.; COSTA, C.H.M.; FERRARI NETO, J. Foliar application of stabilized silicic acid on soybean, common bean, and peaunt, **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.2, p.404-410, 2013.

DELL, B.; HUANG, L. Physiological response of plants to low boron. **Plant and Soil**, v.193, n.2, p.103-120, 1997.

DEMIRAY, H.; DEREBOYLU, A.E. Effects of excess and deficient boron and niacin on the ultrastructure of root cells in *Dacus carota* cv Nantes. **Turkish Journal of Botany**, v.37, n.1, p.160-166, 2014.

DIETZEL, M. Dissolution of silicates and the stability of polysilic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.64, n.19, p.3.275-3.281, 2000.

DORDAS, C. Foliar boron application affects lint and seed yield and improves seed quality of cotton grown on calcareous soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.76, n.1, p.19-28, 2006.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina:Planta, 2006. p.71-84.

FARIAS, A.T.V. **Crescimento e desenvolvimento do algodoeiro em função de doses de silício e ácido salicílico**. 2012. 63f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.

FAROOQ, M.A.; ALI, S.; HAMEED, A.; ISHAQUE, W.; MAHMOOD, K.; IQBAL, Z. 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**, v.96, p.242-249, 2013.

GEORGIEVA, K.; TSONEV, T.; VELIKOVA, V.; YORDANOV, I. Photosynthetic activity during high temperature treatment of pea plants. **Journal of Plant Physiology**, v.157, n.2, p.169-176, 2000.

GOLDBACH, H.E. A critical review on current hypotheses concerning the role of boron in higher plants: suggestions for further research and methodological requirements. **Journal of trace and microprobe techniques**, v.15, n.1, p.51-91, 1997.

GOLDBACH, H.E.; YU, Q.; WINGENDER, R.; SCHULSZ, M.; WIMMER, M.; FINDEKLEE, P.; BALUSKA, F. Rapid response reactions of roots to boron deprivation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.164, n.2, p.173-181, 2001.

GUNES, A.; INAL, A.; BAGCI, E.G.; COBAN, S.; PILBEAM, D.J. Silicon mediates changes to some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under B toxicity. **Scientia Horticulturae**, v.113, n.2, p.113-119, 2007a.

GUNES, A.; INAL, A.; BAGCI, E.G.; COBAN, S.; SAHIN, O. Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. **Biologia Plantarum**, v.51, n.3, p.571-574, 2007b.

HODSON, M.J.; WHITE, P.J.; MEAD, A.; BROADLEY, M.R. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of Botany**, v.96, n.6, p.1.027-1.046, 2005.

INAL, A.; PILBEAM, D.J.; GUNES, A. Silicon increases tolerance to boron toxicity and reduces oxidative damage in barley. **Journal of Plant Nutrition**, v.32, n.1, p.112-128, 2009.

KALAJI, H.M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I.A.; CETNER, M.D.; LUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R.J. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.38, n.4, p.102-113, 2016.

KOBAYASHI, M.; MATOH, T.; AZUMA, J. Two chains of rhamnogalacturona II are cross-linked by borate-diol ester bonds in higher plant cell walls. **Plant Physiology**, v.110, n.3, p.1.017-1.020, 1996.

KOUCHI, H.; KUMAZAWA, K. Anatomical responses of root tips to boron deficiency. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.22, n.1, p.53-71, 1976.

KÖVES-PÉCHY, K.; BIRÓ, B.; WILLIS, I.; TAKÁCS, T.; OSZTOICS, E.; STRASSER, R.J. Enhanced activity of microsymbiont-alfafa system probed by the fast fluorescence rise OJIP. In: GARAB, G. (Ed.) **Photosynthesis: Mechanisms and Effects**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1998. p.2.765-2.768.

LE, V. N.; RUI, Y.; GUI, X.; LI, X.; LIU, S.; HAN, U. Uptake, transport, distribution and bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bt-transgenic cotton. **Journal of Nanobiotechnology**, v.12, n.1, p.50, 2014.

LEE, S.; ARONOFF, S. Boron in plants: a biochemical role. **Science**, v.158, n.3.802, p.798-799, 1967.

LOOMIS, W.D.; DURST, R.W. Chemistry and biology of boron. **BioFactors**, v.3, n.4, p.229–239, 1992.

MA, J.F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier, 2002. p.63-106.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, n.8, p.392-392, 2006.

MARINAKIS, K.I.; SHERGOLD, H.L. Influence of sodium silicate addition on the adsorption of oleic acid by fluorite, calcite and barite. **International Journal of Mineral Processing**, v.14, n.3, p.177-193, 1985.

MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 191-243.

MATHUR, S.; JAJOO, A.; MEHTA, P.; MHARTI, S. Analysis of elevated temperature induced inhibition of photosystem II using chlorophyll a fluorescence induction kinetics in wheat leaves (*Triticum aestivum*). **Plant Biology**, v.13, n.1, p.1-6, 2011.

MEHRABANJOUBANI, P.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H.R.; AGHDASI, M. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. **Pedosphere**, v.25, n.2, p.192-201, 2015.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Berne: International Potash Institute, 1978. p.250.

MIWA, K.; WAKUTA, S.; TAKADA, S.; IDE, K.; TAKANO, J.; NAITO, S.; OMORI, H.; MATSUNAGA, T.; GUJIWARA, T. Roles of BOR2, a boron exporter in cross linking of rhamnogalacturona II and root elongation under boron limitation in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, v.163, n.4, p.1.699-1.709, 2013.

MONICA, R.C.; CREMONINI, R. Nanoparticles and higher plants. **Caryologia**, v.62, n.2, p.161-165, 2009.

NABLE, R.O.; BAÑUELOS, G.S.; PAULL, J.G. Boron toxicity. **Plant and Soil**, v.193, p.181-198, 1997.

NABLE, R.O. Resistance to boron toxicity amongst several barley and wheat cultivars: a preliminary examination of the resistance mechanism. **Plant and Soil**, v.112, p.45-57, 1998.

NEL, A.T.; XIA, T.; MÄDLER, L.; LI, N. The impact of nanoscience on heterogeneous catalysis. **Science**, v.299, n.5.613, p.1.688-1.691, 2003.

OLIVEIRA, R.H.; DIAS MILANEZ, C.R.; MOARES-DALLAQUA, M.A.; ROSOLEM, C.A. Boron deficiency inhibits petiole and peduncle cell development and reduces growth of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, v.29, n.11, p.2.035-2.048, 2006.

OOSTERHUIS, D.M.; ZHAO, D. Effect of boron deficiency on the growth and carbohydrate metabolism of cotton. In: WELCH, R. M. (Ed.) **Plant Nutrition**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. p.166-167.

PERCIVAL, G.C. The use of chlorophyll fluorescence to identify chemical and environmental stress in leaf tissue of three oak (*Quercus*) species. **Journal of Arboriculture**, v.31, n.5, p.215-227, 2005.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. p.25.

RAVEN, J.A. The transport and function of silicone in plants. **Biological Reviews**, v.58, n.2, p.179-207, 1983.

RICHMOND, K.E.; SUSSMAN, M. Got silicon? The non-essential beneficial plant nutrient. **Current Opinion in Plant Biology**, v.6, n.3, p.268-272, 2003.

ROCO, M.C. Broader societal issues of nanotechnology. **Journal of Nanoparticle Research**, v.5, n.3-4, p.181-189, 2003.

SHARKEY, T.D.; SCHRADER, S.M. High temperature stress. In: RAO, D. V. M.; RAGHAVENDRA, A. S.; REDDY, K. J. (Ed.) **Physiology and molecular biology of stress tolerance in plants**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. P.101-129.

SHORROCKS, V.M. The occurrence and correction of boron deficiency. **Plant and Soil**, v.193, n.2, p.121-148, 1997.

SILVA, J.P.P. **Mecanismo de ação do silicado de sódio como depressor em flotação**. 2011. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

SILVA, N.M.; CARVALHO, L.H.; BATAGLIA, O.C.; HIROCE, R. Efeito do boro em algodoeiro cultivado em casa de vegetação. **Bragantia**, v.38, n.16, p.1.653-1.664, 1979.

SORATTO, R.P.; FERNANDES, A.M.; CRUSCIOL, A.C.; SOUZA-SCHLICK, G.D. Leaf application of silicic acid to white, oat and wheat. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.47, n.7, p.1.002-1.008, 2012.

SOUZA FERRAZ, R.L.; MACÊDO BELTRÃO, N.E.; MELO, A.S.; MAGALHÃES, I.D.; FERNANDES, P.D.; SOCORRO ROCHA, M. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.2, p.735-748, 2014.

SOUZA FERRAZ, R.L.; MEDEIROS, A.M.; ROBERTO, P.; VIÉGAS, A.; MELO, A.S.; SILVA, P.C.; MAGALHÃES, I.D.; BARBOSA, M.A.; NETO, J.D.; ORLUCHUKWY, J.A. Potassium silicate optimizes the growth of naturally colored fiber cotton in the Semi-arid. **Journal of Experimental Agriculture International**, v.17, n.4, p.1-14, 2017.

SURIYAPHABHA, R.; KARUNAKARAN, G.; YUVAKKUMAR, R.; RAJENDRAN, V.; KANNAN, N. Silica nanoparticles for increased silica availability in maize (*Zea mays* L.) seeds under hydroponic conditions. **Current Nanoscience**, v.8, n.6, p.902-908, 2012.

TANAKA, M.; FUJIWARA, T. Physiological roles and transport mechanisms of boron: perspectives from plants. **European Journal of Physiology**, v.456, n.4, p.671-677, 2008.

YANG, X.; ROONASI, P.; HOLMGREN, A. A study of sodium silicate in aqueous solution and sorbed by synthetic magnetite using in situ ATR-FTIR spectroscopy. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.328, n.1, p.41-47, 2008.

YAU, S. K.; NACHIT, M.M.; RYAN, J.; HAMBLIN, J. Phenotypic variation in boron toxicity tolerance at seedling stage in durum wheat (*Triticum durum*). **Euphytica**, v.83, n.3, p.185-191, 1995.

CAPÍTULO 2 – Fontes alternativas de silício foliar no desenvolvimento de algodão sob altas temperaturas

Resumo

O silício via foliar, dependendo da fonte, pode ser viável agronomicamente em plantas de algodão cultivadas em altas temperaturas. Objetivou-se verificar a fonte e a concentração de silício que resulta em maior acúmulo de silício e maior produção de massa seca pelo algodoeiro cultivado sob altas temperaturas. Foram utilizadas plantas de algodão cultivar Bayer FM 910® (Transgênico), cultivadas em casa de vegetação dispostas em blocos casualizados, em esquema fatorial 4x4, sendo quatro fontes de silício (silicato de sódio e potássio estabilizado; ácido monossilícico estabilizado; nanossílica e silicato de potássio) e quatro concentrações de silício (0,0; 0,3; 0,6 e 0,8 g L⁻¹ de Si), em quatro repetições. As plantas foram cultivadas em vasos de polipropileno preenchidos com 6 dm³ de areia sob aplicação de solução nutritiva completa. Foram realizadas quatro aplicações foliares de silício, nos estágios fenológicos V6, B4, F2 e C2. Na abertura do primeiro capulho por planta, o experimento foi finalizado, avaliando-se a altura, a eficiência quântica do fotossistema II, o teor de clorofila total, a massa seca e o acúmulo de silício na parte aérea, por planta de algodão. A aplicação foliar de silício é agronomicamente viável para o algodoeiro, pois incrementou o teor de clorofila e a eficiência quântica do fotossistema II, e favoreceu a produção de matéria seca, destacando-se o silício aplicado na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado, na concentração de 0,8 g L⁻¹ de Si.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., elemento benéfico, aplicação foliar.

Introdução

O estresse abiótico tem aumentado com as mudanças climáticas, especialmente devido ao aumento na temperatura (BITA; GERATS, 2013), atingindo as regiões de cultivo do algodoeiro. Em altas temperaturas, a fotossíntese é severamente afetada, sendo este o processo fisiológico vegetal mais sensível ao estresse térmico (SHARKEY; SCHRADER, 2006). Existem relatos, para plantas de algodão, que a aplicação de silício (Si) via radicular aumenta o teor de clorofila (FAROOQ et al., 2013) e, aplicado via foliar, aumenta a eficiência quântica do fotossistema II (SOUZA FERRAZ et al., 2014), podendo beneficiar as plantas cultivadas em condições de altas temperaturas.

O fornecimento de Si para as plantas pode ser via radicular ou foliar; entretanto, a aplicação foliar pode favorecer a absorção por plantas não acumuladoras de Si, que possuem absorção radicular limitada (MA; YAMAJI, 2006), a exemplo do algodoeiro, classificado como intermediária quanto à absorção de Si (MA; TAKAHASHI, 2002; HODSON et al., 2005). Para aplicação foliar, o silicato de potássio sem estabilizante tem sido regularmente utilizado na agricultura; entretanto, novas fontes de Si têm surgido para esta finalidade, como a nanossílica, constituída de nanopartículas de SiO_2 em dispersão coloidal, com dimensões entre 1 e 10 nanômetros (ROCO, 2003) e como as fontes solúveis em água, como o ácido monossilícico estabilizado com PEG400 e o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol.

Diante da falta de conhecimento sobre este tema, é pertinente avaliar as hipóteses: (a) a maior eficiência da aplicação foliar de Si é dependente da fonte e da concentração do elemento; e ainda, (b) o aumento da absorção foliar de Si pode favorecer aspectos básicos da fisiologia, resultando em aumento da produção de matéria seca do algodoeiro cultivado em altas temperaturas. Objetivou-se verificar a fonte e a concentração de Si que resulta em maior acúmulo deste elemento e maior produção de massa seca pela planta de algodão cultivada sob altas temperaturas.

Material e métodos

O experimento foi desenvolvido em plantas de algodão cultivar Bayer FM 910® (Transgênica), cultivado em sistema de cultivo sem solo, em casa de vegetação. Durante o período experimental, a umidade relativa do ar, a temperatura máxima e a temperatura mínima foram registradas com um termo-hidrômetro (Figura 1).

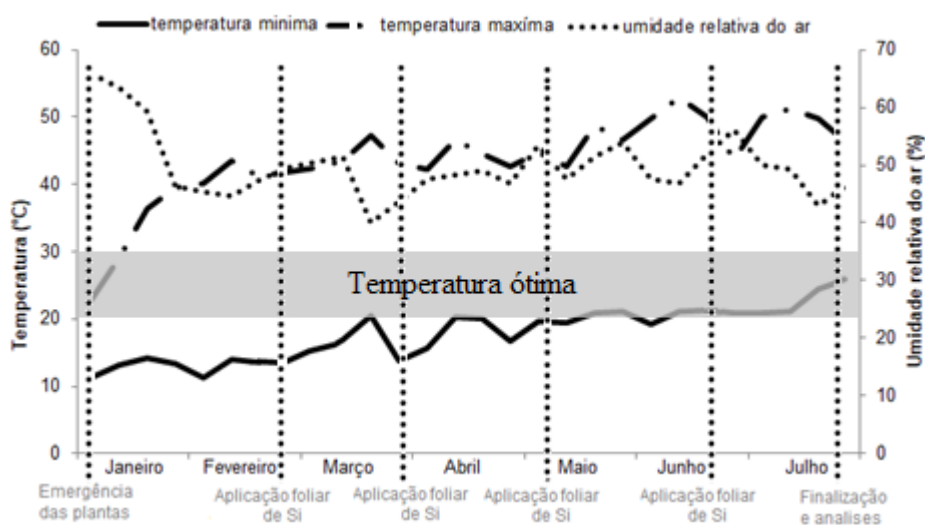


Figura 1. Temperatura mínima, máxima e umidade relativa do ar durante período experimental (janeiro/2016 a julho/2016) no interior da casa de vegetação.

Estes dados indicam variação ampla na umidade relativa média do ar ($52,9 \pm 12,8\%$), na temperatura mínima ($18,5 \pm 7^\circ\text{C}$) e na temperatura máxima ($43,6 \pm 15^\circ\text{C}$), durante o período experimental (Figura 1). Observa-se possível estresse devido às altas temperaturas, considerando que a temperatura média para crescimento ótimo do algodão está entre 20 e 30°C (SNIDER; KAWAKAMI, 2014).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos inteiramente casualizados, em esquema fatorial 4×4 , sendo quatro fontes de silício: silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (SiAl) (107 g L^{-1} de Si; $14,9 \text{ g L}^{-1}$ de Cu, $34,7 \text{ g L}^{-1}$ de K_2O e pH 11,8); ácido monossilícico estabilizado com PEG400 (SiAc) ($14,04 \text{ g L}^{-1}$ de Si e pH 2,5); nanossílica Bindizil® (Nano) (77 g L^{-1} de Si e pH 10,5) e silicato de potássio sem estabilizante (SiK) (128 g L^{-1} de Si; $126,5 \text{ g L}^{-1}$ de K_2O e pH 12,0) e quatro concentrações de Si: 0,0; 0,3; 0,6 e $0,8 \text{ g L}^{-1}$ de Si aplicados em quatro pulverizações, em quatro repetições. Com a finalidade de se equilibrar as

quantidades de cobre e potássio entre as fontes, foram realizadas aplicações foliares com sulfato de cobre (II) e cloreto de potássio.

A unidade experimental foi constituída de vaso de plástico com capacidade para 7 dm³ (diâmetro superior: 16 cm; diâmetro inferior: 11 cm, altura: 33 cm) preenchidos com 6 dm³ de areia textura média. As sementes de algodão foram semeadas em bandeja contendo areia textura média. Após germinação foram transferidas quatro plantas para cada vaso. Com o desenvolvimento das mesmas realizou-se desbaste de modo a ficar uma planta por vaso.

Depois de transplantadas, as plantas foram irrigadas com água deionizada. Duas semanas após, iniciou-se aplicação de solução nutritiva completa de Hoagland e Arnon(1950), de modo a manter 70% da capacidade de campo, com pH entre 5,5 e 6,5 e com modificação na fonte de ferro, de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA. Inicialmente, por um período de sete dias, a solução nutritiva foi aplicada a 10 % da concentração. Após este período, a concentração da solução nutritiva foi aumentada para 25% por uma semana e, transcorrido este período, para 60%, a qual foi mantida até o final do período experimental. Uma vez por semana, foi realizada a drenagem do substrato com a aplicação de água deionizada para se evitar salinização.

O fornecimento de Si foliar foi realizado em quatro estágios fenológicos: V6 (plantas apresentando seis folhas completamente desenvolvidas); B4 (plantas apresentando quatro botões florais); F2 (plantas apresentando duas flores completamente desenvolvidas), e C2 (plantas apresentando dois capulhos). A temperatura (°C) e a umidade relativa do ar (%) foram medidas durante a primeira, segunda, terceira e quarta pulverizações foliares obtendo-se os seguintes valores: 23,4 e 62; 25,4 e 70; 21,2 e 60; 22,4 e 61, respectivamente.

A calda de pulverização foi preparada com as diferentes fontes de Si, sendo o valor pH ajustado entre 6,0 e 7,0, o que poderia favorecer a compatibilidade química se misturada com defensivos. A aplicação foliar do Si foi realizada imediatamente após o preparo da calda com pulverizador manual, visando à cobertura total da parte aérea. O volume de calda aplicado variou de acordo com o tamanho das plantas, sendo aplicados 4,8; 9,6 e 14,4 mL da solução com Si, para a primeira, segunda e terceira pulverizações, respectivamente. Na quarta

pulverização, aplicou-se o mesmo volume da terceira. Durante as aplicações foliares, a superfície do substrato foi coberta com algodão para evitar escorrimento da solução pulverizada para o substrato, de modo a se garantir que a absorção de Si fosse totalmente via foliar.

Com a finalidade de se verificar a polimerização do Si nas fontes utilizadas, foi feito teste utilizando 20 mL de calda, contendo cada uma das fontes a concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$, com o valor pH ajustado para $6,5 \pm 0,2$. Foram obtidos registros fotográficos no momento imediatamente após o preparo da calda (Figura 2a), 6 horas após o preparo da calda (Figura 2b), 12 horas após o preparo da calda (Figura 2c) e 24 horas após o preparo (Figura 2d).

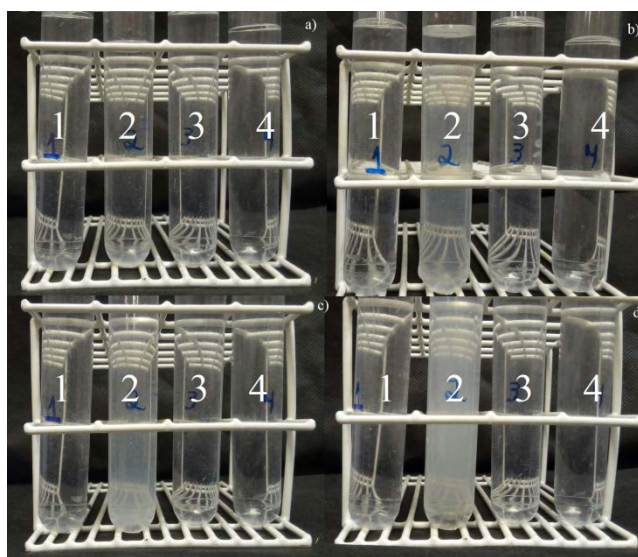


Figura 2. Aspecto visual da calda com Si na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$ (pH $6,5 \pm 0,2$) nas fontes: 1: silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol; 2: ácido silícico estabilizado com PEG400; 3: nanossílica Bindizil®, e 4: silicato de potássio sem estabilizante verificado imediatamente após o preparo da calda (a); 6 horas (b); 12 horas (c), e 24 horas após o preparo (d).

Após a abertura do primeiro capulho em todas as plantas de algodão, o experimento foi finalizado, sendo realizadas as avaliações referentes à altura de plantas, medindo-se do colo da planta até o primeiro nó vegetativo. Na quinta folha totalmente expandida, foi avaliada a eficiência quântica do fotossistema II, medidas com fluorômetro (Opti-sciences® – Os30P⁺), bem como o teor de clorofila total (clorofila a + b), pelo método descrito por Lichtenthaler (1987).

A parte aérea foi coletada e lavada com água deionizada, com solução a 0,1% de detergente, solução a 0,1% de HCl e água deionizada, e então colocada para secar em estufa com circulação fechada de ar, a $65^{\circ}\text{C} \pm 5$, até se obter estabilidade da massa seca. Após secagem, a parte aérea foi pesada e, posteriormente, moída em moinho tipo Wiley para a determinação do teor de Si da parte aérea, segundo método descrito por Korndörfer, Pereira e Nola (2004). A partir do teor de Si e da massa seca da parte aérea, calculou-se o acúmulo de Si por planta.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando significativo, para as diferentes fontes, ao teste de comparação t de Student (LSD), a 5% de probabilidade. Para as concentrações, realizou-se estudo da regressão ortogonal polinomial, escolhendo-se modelo significativo, pelo teste F a 5% de probabilidade e com maior valor do coeficiente de determinação. Em adição, foi realizado estudo de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas, utilizando-se do software AgroEstat® (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2010).

Resultados e Discussão

Houve interação entre as fontes e as concentrações para o acúmulo de Si na parte aérea de plantas de algodão cultivadas em altas temperaturas em casa de vegetação. O aumento na concentração de Si aplicado promoveu incremento linear do acúmulo de Si que variou, dependendo da fonte utilizada (Figura 3).

Na concentração de Si igual a $0,3 \text{ g L}^{-1}$, destacou-se, para acúmulo do elemento, o Si aplicado na forma de SiAl e na forma de SiK; na concentração de $0,6 \text{ g L}^{-1}$, o acúmulo de Si foi semelhante para as fontes utilizadas, excluindo o Si aplicado na forma de Nano, a qual apresentou acúmulo inferior; e na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$, a fonte que resultou em maior acúmulo de Si foi o SiAl (Figura 3).

O melhor desempenho da fonte SiAl, especialmente na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$ de Si, a qual promoveu maior acúmulo do elemento nas plantas de algodão (Figura 3), pode ser atribuído à maior estabilidade das espécies monoméricas de silício, como o ácido monossilícico $[\text{Si}(\text{OH})_4]$, no pH da calda (6,0 – 7,0) devido à presença do sorbitol nesta fonte, o qual possui função estabilizante (KUBICKI;

HEANEY, 2003). É esperado que a fonte de Si com maior quantidade do elemento, na forma de $[\text{Si}(\text{OH})_4]$, favoreça a absorção, pois esta é a forma absorvida pelos vegetais (EPSTEIN; BLOOM, 2006)

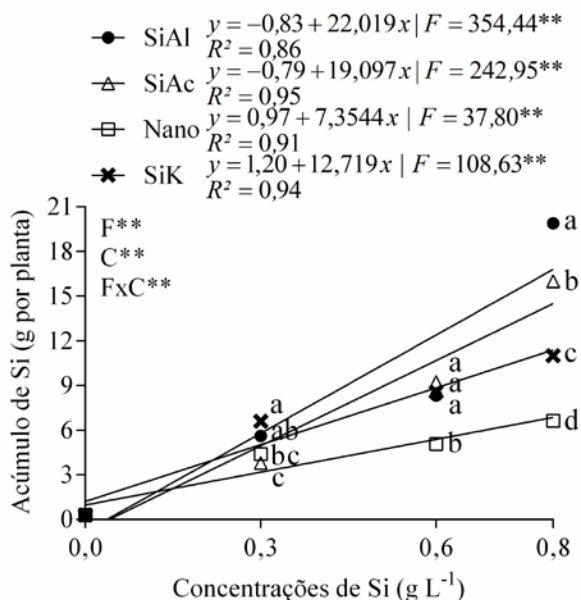


Figura 3. Acúmulo de silício na parte aérea de plantas de algodão submetidas a diferentes fontes (F) de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado (SiAl); ácido silícico estabilizado (SiAc); nanossílica (Nano) e silicato de potássio (SiK); e diferentes concentrações (C) de Si, cultivadas em casa de vegetação. ** - significativos a 1% de probabilidade. Letras distintas diferem as fontes em uma mesma concentração de Si, pelo teste t Student.

É importante salientar que a fonte SiAc apresentou desempenho inferior ao SiAl, para acúmulo de Si na planta de algodão, apesar de apresentar Si prontamente disponível no pH do produto que é ácido ($\text{pH} = 2,5$) (Figura 3). Esse fato ocorreu devido à diluição do produto no preparo da calda e o ajuste do pH da calda entre 6,0 – 7,0 ter favorecido o início de reações de polimerização, diminuindo espécies monoméricas de Si com reflexos na absorção do elemento, conforme observado pela alteração da cor da calda de aplicação (Figura 2).

Ocorreu interação entre os tratamentos fontes e concentrações para o teor de clorofila total, em plantas de algodão cultivadas sob altas temperaturas (Figura 4a). Observou-se, para todas as fontes empregadas, incremento linear no teor de clorofila total, em função da concentração de Si aplicado. O Si aplicado na forma de SiAl e SiAc destacou-se, sendo as fontes que mais beneficiaram a produção de

clorofila na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$ (Figura 4a). De forma análoga ao teor de clorofila, foi observado interação entre as fontes e as concentrações para a EQFSII de plantas de algodão cultivadas sob altas temperaturas (Figura 4b), com incremento linear para EQFSII, em função da concentração de Si aplicado via foliar para todas as fontes utilizadas, excluindo-se o Si aplicado na forma de SiK, o qual não apresentou modelo de regressão significativo (Figura 4b).

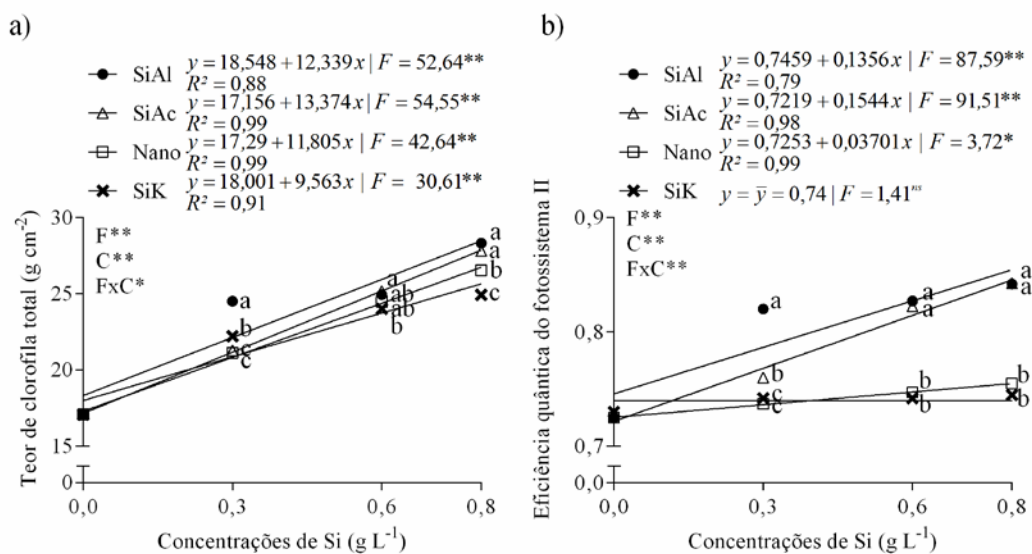


Figura 4. Teor de clorofila total (a+b) em folhas de algodão (a), e eficiência quântica do fotossistema II de plantas de algodão (b) submetidas a diferentes fontes (F) de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado (SiAl); ácido silícico estabilizado (SiAc); nanossílica (Nano) e silicato de potássio (SiK); e diferentes concentrações (C) de Si, cultivadas em casa de vegetação sob altas temperaturas. **, * - significativos a 1% e a 5% de probabilidade, respectivamente. Letras distintas diferem as fontes em uma mesma concentração de Si, pelo teste t Student.

O menor conteúdo de clorofila presente na concentração de $0,0 \text{ g L}^{-1}$ de Si (controle) (Figura 4a), provavelmente, deve-se ao efeito da alta temperatura durante o cultivo das plantas, pois existem relatos que essa condição ambiental pode induzir a desnaturação da clorofila (YAMANE et al., 1997). A aplicação foliar de Si tem demonstrado resultados satisfatórios em plantas cultivadas sob situação de estresse, elevando a produção de clorofila por unidade de área, conforme constatado por Farooq et al.(2013), em plantas de algodão que receberam Si, mas por via radicular. Desta forma, o Si atua diminuindo os danos causados pela alta temperatura por aumentar a eficiência das plantas no uso da luz disponível (ASHRAF et al., 2010), mesmo com a aplicação foliar do elemento.

O baixo valor da EQFSII observado na concentração de $0,0 \text{ g L}^{-1}$ de Si (controle) também é atribuído às altas temperaturas, estando relacionado com a diminuição das reações fotossintéticas do fotossistema II e com a inibição do fluxo de elétrons transferidos entre a quinona “a” e a quinona “b” (MATHUR et al., 2011), afetando a eficiência quântica do fotossistema II (KALAJI et al., 2016). A aplicação de Si via foliar, em plantas de algodão, tem beneficiado a EQFSII (Figura 4b), conforme também observado por Souza Ferraz et al. (2014). Este efeito benéfico do silício pode estar relacionado com a otimização da capacidade de absorção e do aproveitamento da energia luminosa pelo fotossistema II (NETTO et al., 2005).

A aplicação foliar de silício incrementou, com ajuste linear, a altura das plantas de algodão, independentemente da fonte aplicada (Figura 5a). Observou-se destaque para o Si aplicado na forma de SiAl, para as concentrações de $0,3$; $0,6$ e $0,8 \text{ g L}^{-1}$, não havendo diferença para essa variável entre as outras fontes, nas concentrações de $0,3$; $0,6$ e $0,8 \text{ g L}^{-1}$ (Figura 5a). A aplicação foliar de Si também incrementou, com o ajuste linear, a massa seca das plantas de algodão, mas dependente da fonte do elemento (Figura 5b). A aplicação foliar de Si destacou-se para a fonte SiAl na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$, não sendo observada diferença entre as fontes nas concentrações de $0,3$ e $0,6 \text{ g L}^{-1}$ (Figura 5b).

A menor produção de matéria seca do tratamento com $0,0 \text{ g L}^{-1}$ de Si (Controle) (Figura 5b) deve-se, possivelmente, à alta temperatura, pois durante o cultivo a temperatura atingiu máxima de $43,6^{\circ}\text{C} \pm 9$, muito superior à temperatura ótima da cultura (20 a 30°C) (SNIDER; KAWAKAMI, 2014).

O aumento da produção de matéria seca de plantas de algodão após quatro aplicações foliares de Si recebeu maior contribuição do teor de clorofila total, dada a alta correlação entre estas variáveis ($r = 0,68^{**}$), embora as demais variáveis: altura ($r = 0,59^{**}$) e eficiência quântica do fotossistema II ($r = 0,57^{**}$) também tenham contribuído. Estes resultados indicam que o Si favorece a produção de matéria seca em plantas de algodão cultivadas sob estresse térmico; entretanto, são incipientes trabalhos na literatura com esta cultura, embora existam relatos em outras, como sorgo (HATTORI et al., 2005).

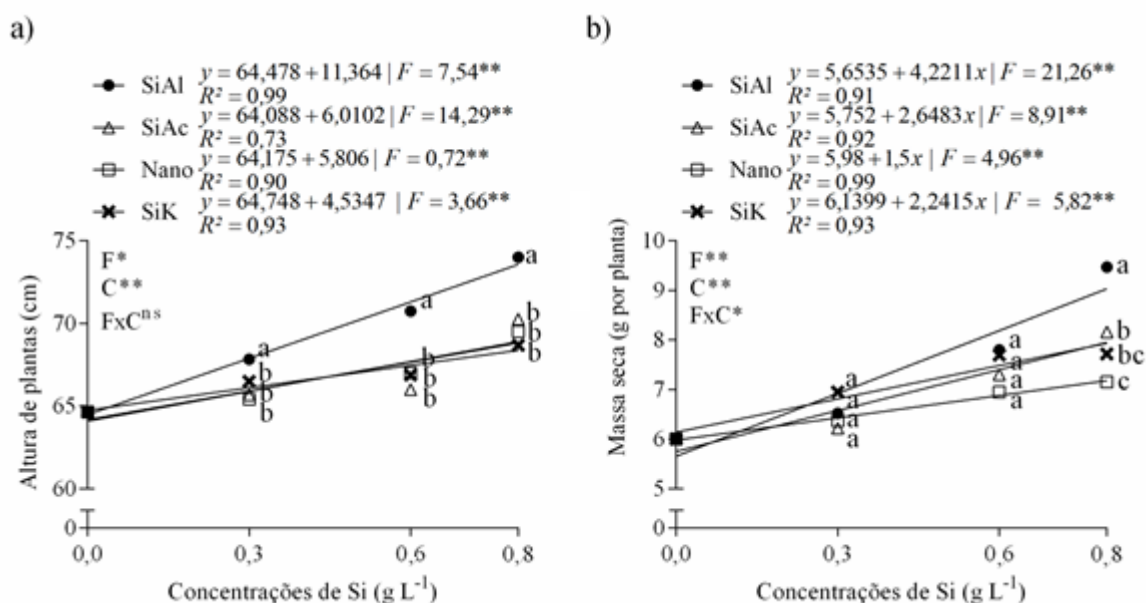


Figura 5. Altura (a) e massa seca (b) de plantas de algodão submetidas a diferentes fontes (F) de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado (SiAl); ácido silícico estabilizado (SiAc); nanossílica (Nano) e silicato de potássio (SiK); e diferentes concentrações (C) de Si, cultivadas em casa de vegetação sob altas temperaturas. **, * e ns - significativos a 1%, 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente. Letras comparam as diferentes fontes em uma mesma concentração de Si, pelo teste t Student.

Conclusão

A aplicação foliar de Si é viável agronomicamente para o algodoeiro, pois incrementou o acúmulo de Si, o teor de clorofila e a eficiência quântica do fotossistema II, favorecendo a produção de matéria seca, destacando-se o Si aplicado na forma de silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol, na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$ de Si.

Referências

- ASHARAF, M.; AFZAL, M.; AHMAD, R.; MAQSOOD, M.A.; SHAHZAD, S.M.; AZIZ, A.; AKHTAR, N. Silicon management for mitigating abiotic stress effects in plants. **Plant Stress**, v.4, n.2, p.104-114, 2010.
- BARBOSA, J.C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agrônômica & Agroestat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Multipress, 2016. 396p.

BITA, C.E.; GERATS, T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. **Frontiers in Plant Science**. v.4, p.1-18, 2013.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina:Planta, 2006. p.71-84.

FAROOQ, M.A.; ALI, S.; HAMEED, A.; ISHAQUE, W.; MAHMOOD, K.; IQBAL, Z. 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**, v.96, p.242-249, 2013.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVA, M.; LUX, A. Application of silicone enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, v.123, n.4, p.459-466, 2005.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. **The water-culture method for growing plants without soil**. California: California Agricultural experiment Station, 1950. 32p. (Circular v. 247).

HODSON, M.J.; WHITE, P.J.; MEAD, A.; BROADLEY, M.R. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of Botany**, v.96, n.6, p.1.027-1.046, 2005.

KALAJI, H.M.; JAJOO, A.; OUKARROUM, A.; BRESTIC, M.; ZIVCAK, M.; SAMBORSKA, I.A.; CETNER, M.D.; LUKASIK, I.; GOLTSEV, V.; LADLE, R.J. Chlorophyll a fluorescence as a toll to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.38, n.4, p.102-113, 2016.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; NOLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: UFU, 2004. 34p. (Boletim técnico v.2).

KUBICKI, J.D.; HEANEY, P.J. Molecular orbital modeling of aqueous organosilicon complexes: Implications for silica biomineralization. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v.67, n.21, p.4.113-4.121, 2003.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v.148, n.C, p.350-382, 1987.

MA, J.F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier, 2002. p.63-106.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v.11, n.8, p.392-392, 2006.

MATHUR, S.; JAJOO, A.; MEHTA, P.; MHARTI, S. Analysis of elevated temperature induced inhibition of photosystem II using chlorophyll a fluorescence induction kinetics in wheat leaves (*Triticum aestivum*). **Plant Biology**, v.13, n.1, p.1-6, 2011.

NETTO, A.T.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J.G.; BRESSAN-SMITH, R. E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v.4, n.2, p.199-209, 2005.

ROCO, M.C. Broader societal issues of nanotechnology. **Journal of Nanoparticle Research**, v.5, n.3-4, p.181-189, 2003.

SHARKEY, T.D.; SCHRADER, S.M. High temperature stress. In. RAO, D. V. M.; RAGHAVENDRA, A. S.; REDDY, K.J. (Ed.) **Physiology and molecular biology of stress tolerance in plants**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006. p.101-129.

SNIDER, J.L.; KAWAKAMI, E.M. Efeito da temperatura no desenvolvimento do algodoeiro. In: ECHER, F.R. (Ed.) **O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e micronutrientes**. Dourados: Alice, 2006. p.25.

SOUZA FERRAZ, R.L.; MACÊDO BELTRÃO, N.E.; MELO, A.S.; MAGALHÃES, I.D.; FERNANDES, P.D.; SOCORRO ROCHA, M. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.2, p.735-748, 2014.

YAMANE, Y.; KASHINO, Y.; KOIKE, H.; SATOH, K. Increases in the fluorescence F_o level and reversible inhibition of photosystem II reaction center by high-temperature treatments in higher plants. **Photosynthesis Research**, v.52, n.1, p.57-64, 1997.

CAPÍTULO 3 – Nível crítico de deficiência e toxicidade de boro na solução nutritiva cultivada com plantas de algodão

Resumo

Para o desenvolvimento adequado das plantas de algodão, são importantes os níveis críticos de B na solução nutritiva, mas não são conhecidos em plantas transgênicas. Objetivou-se definir o nível crítico de boro na solução nutritiva para deficiência e toxicidade em plantas de algodão cultivadas em sistema de cultivo sem solo. Foi desenvolvido experimento em plantas transgênicas de algodão, cultivar Bayer 910®, cultivado em sistema de cultivo sem solo. O delineamento experimental utilizado foi em blocos inteiramente casualizados, com oito concentrações de boro: 0,0; 23,1; 46,2; 69,3; 92,4; 115,5; 138,6 e 161,7 $\mu\text{mol L}^{-1}$, aplicados na forma de ácido bórico, em cinco repetições. A unidade experimental foi constituída por um vaso de polipropileno preenchido com 6 dm³ de areia textura média, com duas plantas. As plantas foram coletadas no estágio fenológico V7 (sete folhas completamente expandidas) e foram avaliadas as variáveis biológicas de crescimento, a matéria seca e o acúmulo de B. O nível crítico da concentração de B na solução nutritiva, por deficiência e toxicidade, associado à diminuição de 25% da produção de massa seca de plantas de algodão, foi de 33,7 e 130,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de B, respectivamente.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., micronutriente, nutrição boratada, desordem nutricional.

Introdução

Em algodoeiro, existem muitos relatos de prejuízo na produção por deficiência de boro (B) (BOGIANI; ROSOLEM, 2012; AHMED et al., 2013; BOGIANI et al., 2014), indicando que as plantas de algodão podem ser responsivas à fertilização boratada (BELLALLOUI; TURLEY; STETINA, 2015).

Em plantas de algodão deficientes em B, as raízes apresentam coloração escura, menor comprimento, engrossamento e alta emissão de raízes laterais (OLIVEIRA et al., 2006; BOGIANI; ROSOLEM, 2012), e, apesar de não afetar a produção de clorofila (DORDAS, 2006; AHMED et al., 2014), a deficiência de B prejudica o desenvolvimento em altura e a produção de biomassa de plantas de algodão (MENGEL; KIRKBY, 1978). No entanto, o suprimento adequado de boro, para a cultura do algodoeiro, aumenta o diâmetro caular, o desenvolvimento do sistema radicular (ARAÚJO; SILVA, 2012) e a altura das plantas (AHMED et al., 2013).

Em doses de B excessivas, pode induzir sintomas de toxicidade do micronutriente, iniciando nas margens das folhas maduras que ficam cloróticas ou necróticas (YAU et al., 1995) e diminuindo a altura e a produção de biomassa da planta (AHMED et al., 2013).

É amplamente relatado que a diferença entre a dose de B adequada e a excessiva é relativamente pequena, sendo possível verificar efeito tóxico deste elemento na cultura do algodão, quando cultivado em altas concentrações do nutriente (AHMED et al., 2011). No entanto, isso é discutível, havendo relatos de que as plantas de algodão apresentam tolerância razoável a doses relativamente altas do micronutriente (BAÑUELOS et al., 1999).

Isto ocorre porque as plantas apresentam mecanismos de tolerância a elevadas concentrações de B no ambiente de cultivo, a partir de adaptações fisiológicas, como menor acúmulo de B nas folhas jovens e nos brotos, comparado a plantas não tolerantes, devido à menor absorção e transporte de B (BAÑUELOS et al., 1999). Em níveis tóxicos de B, foi observado em *A. thaliana* que o transportador BOR4-GFP do nutriente é produzido em excesso, favorecendo a saída de B para o exterior da célula e conferindo à planta tolerância à toxicidade de B (REID, 2007).

Os níveis críticos de deficiência e toxicidade de B na solução nutritiva não estão bem definidos na literatura. Existem apenas indicações de concentrações adequadas de B na solução nutritiva cultivada com plantas de algodão, variando de 13 a 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (BOGIANI et al., 2014) até 50 a 80 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (ARAÚJO; SILVA, 2012); mas, com o surgimento de algodão transgênico, pode induzir diferenças na resposta da planta ao micronutriente.

Para ampliar o conhecimento do presente tema, é importante verificar a hipótese se a faixa de amplitude dos níveis críticos de deficiência e toxicidade de B na solução nutritiva é relativamente larga, indicando tolerância das plantas de algodão transgênico a concentrações elevadas do micronutriente.

Objetivou-se definir o nível crítico de boro na solução nutritiva para deficiência e toxicidade em plantas de algodão cultivadas em sistema de cultivo sem solo.

Material e métodos

O experimento foi desenvolvido em planta de algodão cultivar Bayer FM 910[®] (Transgênica), cultivado em sistema de cultivo sem solo, em casa de vegetação. Durante o período experimental, a umidade relativa do ar, a temperatura máxima e a temperatura mínima foram registradas com um termo-hidrômetro (Figura 1).

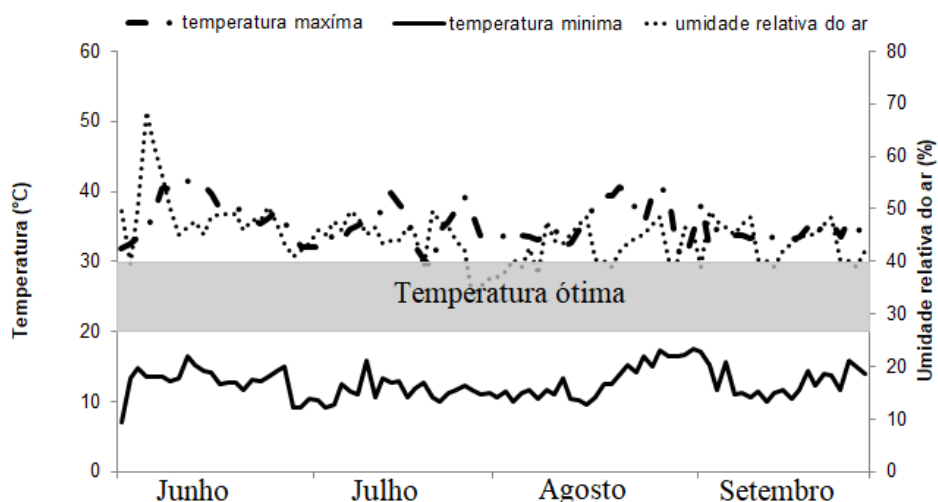


Figura 1. Temperatura mínima, máxima e umidade relativa do ar durante período experimental (junho/2017 a setembro/2017), no interior da casa de vegetação.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos inteiramente casualizados, com oito concentrações de boro: 0,0; 23,1; 46,2; 69,3; 92,4; 115,5; 138,6 e 161,7 $\mu\text{mol L}^{-1}$, aplicados na forma de ácido bórico, em cinco repetições.

As unidades experimentais foram compostas por vasos de polipropileno, com capacidade para 7 dm³ (diâmetro superior: 16 cm; diâmetro inferior: 11 cm; altura: 33 cm), preenchidos com 6 dm³ de areia textura média, com duas plantas por vaso.

As sementes de algodão foram semeadas em bandeja contendo areia textura média e, com a germinação, foram transferidas 4 plantas para cada vaso. Com o desenvolvimento das mesmas, realizou-se desbaste, de modo a ficarem duas plantas por vaso.

Após o transplântio, as plantas foram irrigadas com água destilada e duplamente deionizada para se eliminar contaminação por boro nos tratamentos. Duas semanas após, iniciou-se aplicação de solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), preparada com água destilada e duplamente deionizada, de modo a manter 70% da capacidade de campo, com valor pH entre 5,5 e 6,5 e com modificação na fonte de ferro, de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA, e sem a presença de B. Inicialmente, por um período de sete dias, a solução nutritiva foi aplicada a 10 % da concentração. Após este período, a concentração da solução nutritiva foi aumentada para 25%, acrescentando-se o B de cada tratamento, por uma semana e, transcorrido este período, para 60%, acrescentando-se o B de cada tratamento sendo mantida até o final do período experimental. Uma vez por semana, foi realizada a drenagem do substrato com a aplicação de água deionizada para se evitar a salinização do substrato.

O experimento foi finalizado com as plantas em estágio fisiológico V7 (sete folhas completamente expandidas), sendo realizadas avaliações biométricas referentes à altura, medindo-se do colo da planta até ao primeiro nó vegetativo; diâmetro, medido na base do colo; área foliar, mensurada com aparelho Li – 3100 AreaMeter®; e comprimento da raiz, medindo-se da base do colo até à ponta da raiz principal. A parte aérea foi separada das raízes, sendo ambas acondicionadas em sacos de papel e, posteriormente, colocadas em estufa de circulação fechada de ar a 65°C $\pm$ 5, até se obter a estabilidade da massa seca.

Após secas, as amostras foram pesadas e, posteriormente, moídas em moinho tipo Wiley, para a determinação do teor de boro, segundo método descrito por Bataglia et al. (1978).

Com os acúmulos de B na raiz, massa seca e na planta inteira, e com a massa seca da raiz, parte aérea e planta inteira, foram calculadas as eficiências de absorção (EA) (SWIADER; CHYAN; FREIJI, 1994) e de utilização (EU) (SIDDIQI; GLASS, 1981).

O nível crítico por deficiência e por toxicidade foi definido como a concentração de boro, que ocasionou 25% de redução na produção de massa seca das plantas de algodão, que poderia caracterizar desordem nutricional de moderada a severa.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, e, quando significativo, ao estudo de regressão polinomial ortogonal e ao estudo de correlação de Pearson, utilizando-se do software estatístico AgroEstat® (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2010).

Resultados e Discussão

As plantas de algodão cultivadas na ausência de boro ($0 \mu\text{mol L}^{-1}$) não completaram o ciclo da cultura e morreram no estágio vegetativo F2, impossibilitando a avaliação, sendo excluído esse tratamento. Salienta-se que, nestas plantas, foi observado sintoma severo com plantas com folhas necrosadas e raiz raquítica, inclusive com coloração escura e excesso de raízes laterais. Estes sintomas também foram descritos por Oliveira et al. (2006) em plantas de algodão.

Houve incremento com ajuste quadrático no acúmulo de B na raiz (Figura 2a), na parte aérea (Figura 2b) e na planta inteira (Figura 2c), em função do aumento da concentração de B na solução nutritiva. As concentrações de B iguais a 85,8; 80,1 e 81,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$ resultaram no acúmulo máximo de 67; 326 e 393 mg de B na raiz, na parte aérea e na planta inteira, respectivamente.

Salienta-se que, nas maiores concentrações de B na solução nutritiva, o acúmulo de B foi prejudicado, pois plantas cultivadas sob toxicidade de boro

diminuem a absorção do mesmo, como mecanismo de defesa, para evitar danos às regiões metabólicas importantes (NABLE; BAÑUELOS; PAULL, 1997)

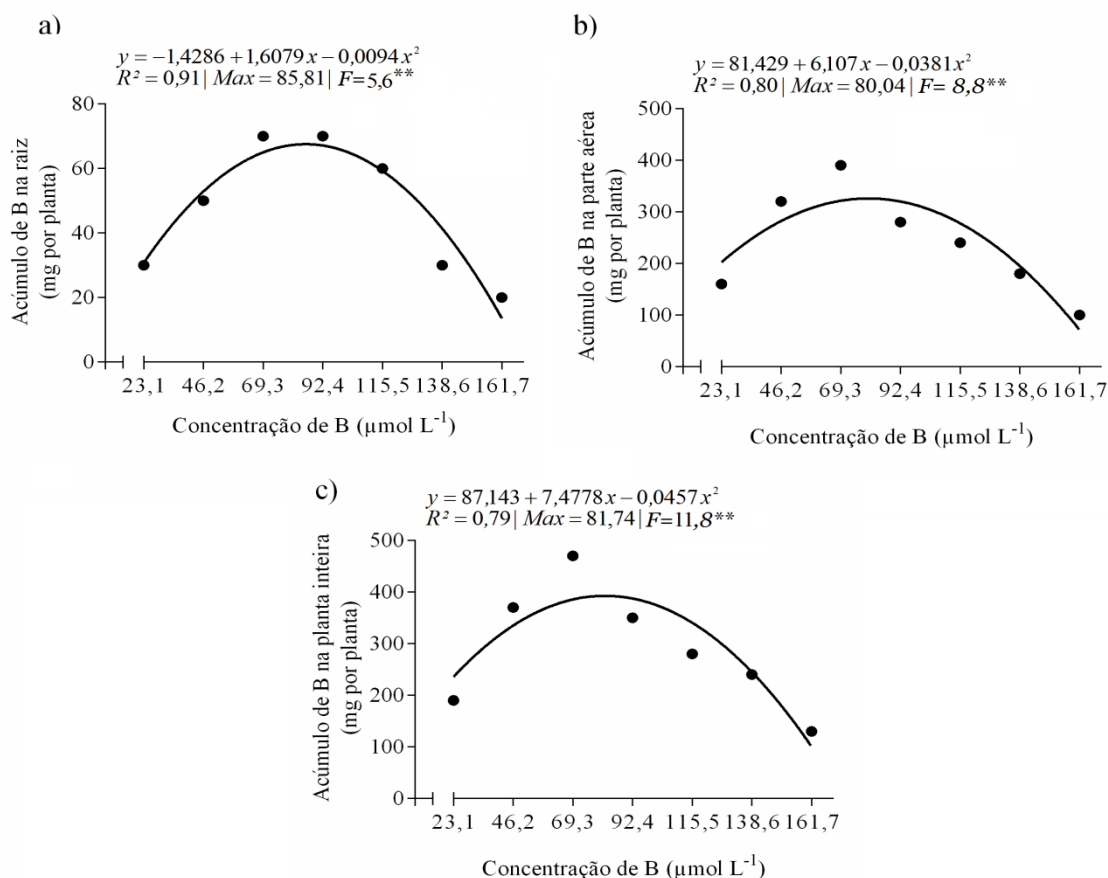


Figura 2. Acúmulo de boro na raiz (a), na parte aérea (b) e na planta inteira (c) das plantas de algodão sob concentrações de boro na solução nutritiva. Max. Indica o ponto máximo da equação.

O ponto máximo para o acúmulo de B foi observado na concentração de $80,1 \mu\text{mol L}^{-1}$ (Figura 2c). Araújo e Silva (2012) relataram acúmulo máximo de B em plantas de algodão cultivadas em sistema de cultivo sem solo, na concentração de $80 \mu\text{mol L}^{-1}$.

De forma análoga ao acúmulo de B, as variáveis biométricas referentes à altura de plantas (Figura 3a), diâmetro do caule (Figura 3b) e comprimento da raiz (Figura 3c) também apresentaram incremento com ajuste quadrático, em função das concentrações de B na solução nutritiva.

Os pontos máximos foram observados nas concentrações de B iguais a $92,3$; $93,7$ e $95,4 \mu\text{mol L}^{-1}$, que resultaram nos maiores valores para altura de plantas,

diâmetro do caule e comprimento de raiz, respectivamente. O nível crítico de B na solução nutritiva, para deficiência e toxicidade, respectivamente, foi de 26,7 e 158,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (altura) e 28,9 e 161,6 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (comprimento de raiz), não sendo observado nível crítico, com diminuição de 25% para diâmetro do caule.

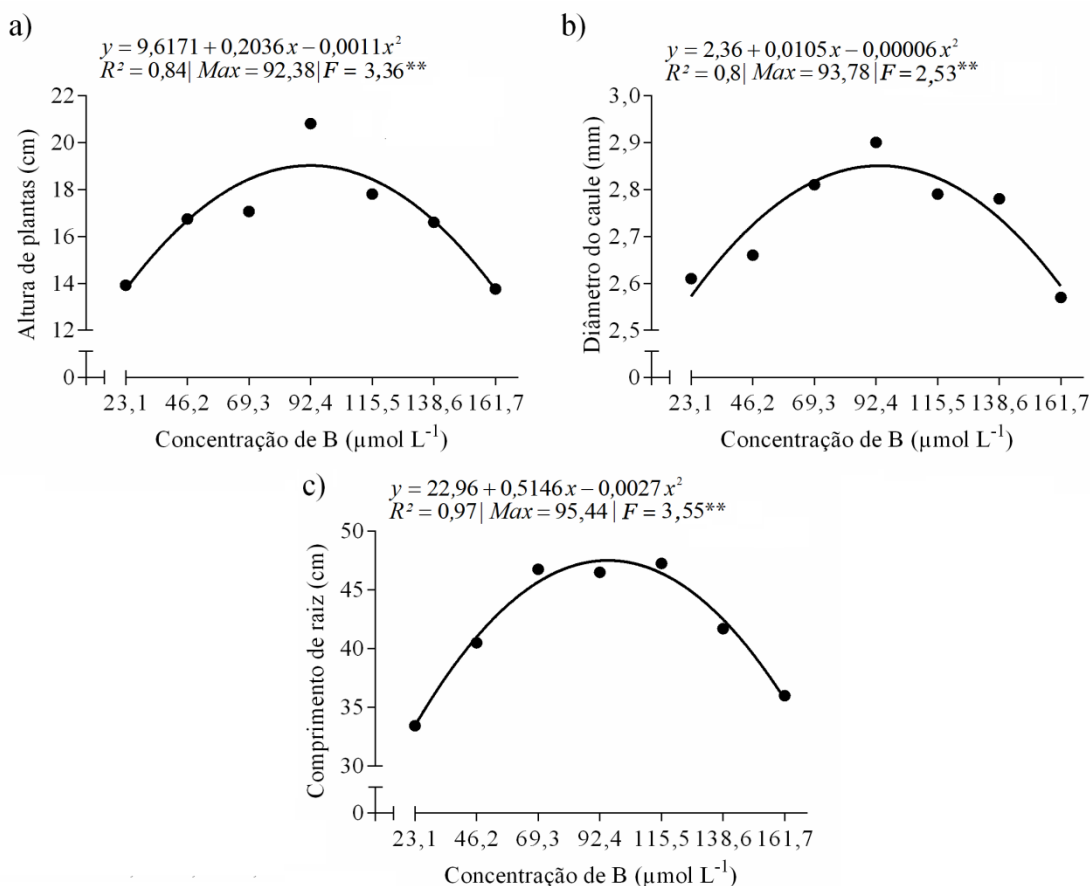


Figura 3. Altura de plantas (a), diâmetro do caule (b) e comprimento de raiz (c) de plantas de algodão sob concentrações de boro na solução nutritiva. Max. Indica o ponto máximo da equação.

Com estudo de correlação entre comprimento da raiz e o acúmulo de B, verificou-se que o aumento no comprimento de raiz recebeu contribuição do acúmulo de B na parte aérea ($r = 0,52^{**}$) e do acúmulo de B na raiz ($r = 0,39^{**}$). A importância do B no crescimento da raiz foi relatado por outros autores (GOLDBACH et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2006; MIWA et al., 2013; DEMİRAY; DEREBOYLU, 2014).

Araújo e Silva (2012) estudaram concentrações de B na solução nutritiva em plantas de algodão. Observaram incremento quadrático para diâmetro caulinar,

com ponto máximo na concentração de $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ e incremento linear para altura de plantas até $80 \mu\text{mol L}^{-1}$.

O baixo comprimento da raiz das plantas de algodão, cultivadas em baixas concentrações de boro (Figura 3c), pode ser explicado pela diminuição da atividade meristemática da mesma, a qual é severamente afetada pela deficiência de B (KOUCHI; KUMAZAWA, 1976), como também observado por Oliveria et al. (2006).

O decréscimo da altura em plantas de algodão, cultivadas em condições com excesso de B, pode ser atribuído ao efeito adverso do boro na atividade metabólica das plantas, pois em excesso o B causa distúrbios metabólicos na formação de complexo, com NAD^+ dos ribossomos, afetando a formação da estrutura do RNA (LOOMIS; DURST, 1992), conforme relatado por Ahmed et al. (2011).

A aplicação de B na solução nutritiva incrementou a produção de matéria seca da raiz (Figura 4a), da parte aérea (Figura 4b) e da planta inteira (Figura 4c), atingindo pontos de máximo nas concentrações de $86,0$; $82,3$ e $82,1 \mu\text{mol L}^{-1}$ de B na solução nutritiva, respectivamente.

O acúmulo de B na parte aérea favoreceu a produção de matéria seca da raiz ($r = 0,66^{**}$) e da parte aérea ($r = 0,72^{**}$), apesar de o acúmulo de B na raiz também contribuir com a produção de matéria seca da raiz ($r = 0,40^{**}$) e da parte aérea ($r = 0,65$). A produção de matéria seca da planta inteira recebeu contribuição do acúmulo de B na planta inteira ($r = 0,79^{**}$), sendo a maior contribuição oriunda do acúmulo de B na parte aérea ($r = 0,74^{**}$), comparada à contribuição do acúmulo de B na raiz ($r = 0,58^{**}$). Observa-se a importância da absorção de B pela planta de algodão na produção de matéria seca, fato amplamente relatado por outros autores (DELL; HUANG, 1997; OOSTERHUIS; ZHAO, 2001; OLIVEIRA et al., 2006; BOGIANI et al., 2014).

O nível crítico, com redução de 25% do máximo de matéria seca produzido pelas plantas de algodão, foi observado com produção de massa seca de $0,74 \text{ g}$; $1,25 \text{ g}$ e $1,95 \text{ g}$ para raiz (Figura 4a), parte aérea (Figura 4b) e planta inteira (Figura 4c), respectivamente, sendo observado, para deficiência, nas concentrações de $32,4$; $32,5$ e $33,7 \mu\text{mol L}^{-1}$ de B, e para toxicidade, nas concentrações de $139,6$; $132,1$ e $130,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de B para raiz (Figura 4a), parte aérea (Figura 4b) e planta inteira (Figura 4c), respectivamente.

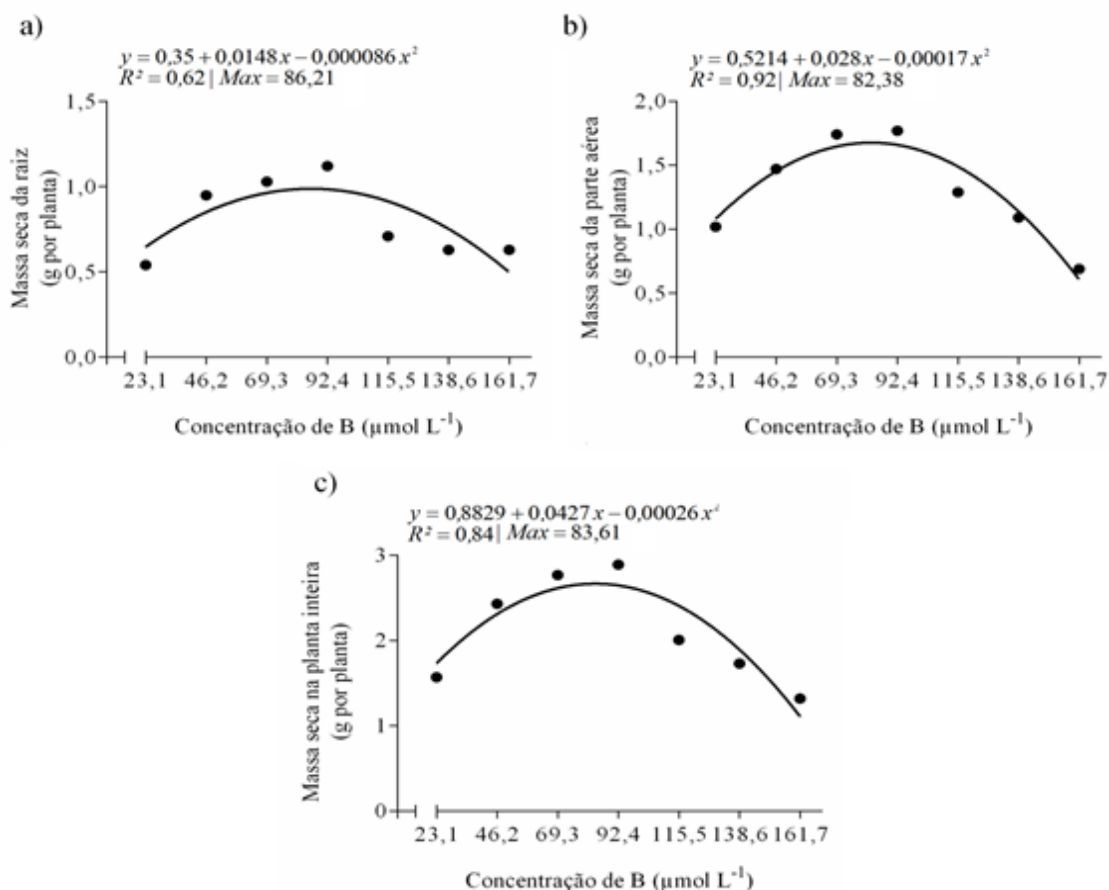


Figura 4. Produção de massa seca da raiz (a), parte aérea (b) e planta inteira (c), de plantas de algodão, sob concentrações de boro na solução nutritiva. Max. Indica o ponto máximo da equação.

Foram observadas diferenças visuais nas plantas de algodão, indicando prejuízo no crescimento da planta, tanto nas concentrações de B baixas como altas na solução nutritiva, indicando as desordens nutricionais por deficiência e por toxicidade (Figura 5).

O acúmulo de B na parte aérea favoreceu a produção de matéria seca da raiz ($r = 0,66^*$) e da parte aérea ($r = 0,72^{**}$), apesar de o acúmulo de B na raiz também favorecer a produção de massa seca da raiz ($r = 0,40^{**}$) e da parte aérea ($r = 0,65^{**}$). A produção de matéria seca da planta inteira recebeu contribuição do acúmulo de B na planta inteira ($r = 0,79^{**}$), sendo a maior contribuição oriunda do acúmulo de B na parte aérea ($r = 0,74^{**}$), comparado ao acúmulo de B na raiz ($r = 0,58^{**}$).

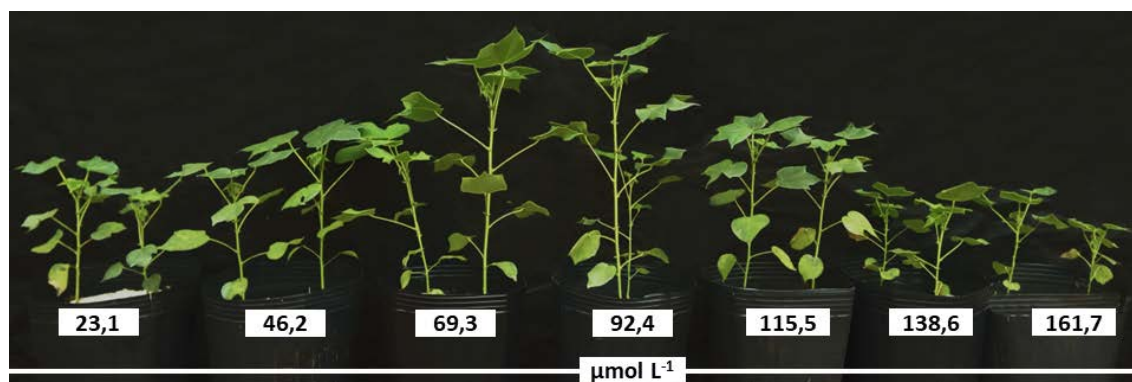


Figura 5. Aspecto visual das plantas de algodão (estágio fenológico F7) em função de diferentes concentrações de B na solução nutritiva.

O efeito do B na produção de matéria seca refletiu nas eficiências de absorção (Figura 6a) e de uso (Figura 6b), atingindo pontos máximos nas concentrações de 60,0 e 86,2 $\mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente.

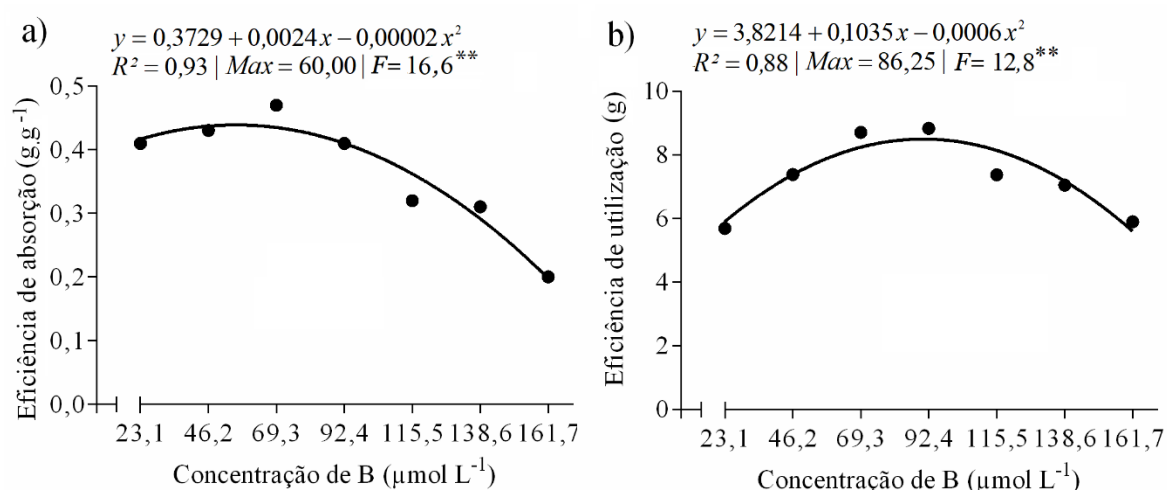


Figura 6. Eficiência de absorção (a) e de uso do boro (b) em plantas de algodão cultivadas sob concentrações de boro na solução nutritiva. Max. Indica o ponto máximo da equação.

O suprimento adequado de B resulta em bom desenvolvimento do sistema radicular, aumentando a EA (Figura 6a). Araújo e Silva (2012) verificaram aumento da eficiência de absorção com as concentrações de B na solução nutritiva até 80 $\mu\text{mol L}^{-1}$. Por outro lado, quando há excesso de B na solução nutritiva, tem-se decréscimo na EA, pois esta variável indica a capacidade das plantas em absorver nutrientes da solução do solo (PRADO, 2008). Com o distúrbio nutricional, seja por deficiência, seja por toxicidade de boro, o desenvolvimento das plantas de algodão

foi prejudicado (Figura 6b), devido à diminuição da EU, ou seja, tem-se menor produção de massa seca por unidade de nutriente absorvido, diminuindo a EU.

Conclusão

O nível crítico da concentração de B na solução nutritiva, por deficiência e toxicidade, associado à diminuição de 25% da produção de massa seca de plantas de algodão, foi de 33,7 e 130,5 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de B.

Referências

- AHMED, N.; ABID, M.; AHMAD, F.; AMAN ULLAH, M.; JAVAID, Q.; ARIF ALI, M. Impact of boron fertilization on dry matter production and mineral constitution of irrigated cotton. **Pakistan Journal of Botany**, v.43, n.6, p.2.903–2.913, 2011.
- AHMED, N.; ABID, M.; RASHID, A.; ABOU-SHANAB, R.; AHMAD, F. Influence of boron nutrition on membrane leakage, chlorophyll content and gas exchange characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Journal of Plant Nutrition**, v.37, n.14, p.2.302–2.315, 2014.
- AHMED, N.; ABID, M.; RASHID, A.; ALI, M. A.; AMMANULLAH, M. Boron requirement of irrigated cotton in a typic haplocambid for optimum productivity and seed composition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.44, n.8, p.1.293–1.309, 2013.
- ARAÚJO, É.O.; SILVA, M.A.C. Interação boro e zinco no crescimento, desenvolvimento e nutrição do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.7, p.720–727, 2012.
- BAÑUELO, G.S.; AJWA, H.; CÁCERES, L.; DYER, D. Diferencias de acumulación y tolerancia a altas concentraciones de boro de especies agrícolas entre el Norte de Chile y California, Estados Unidos. **Idesia**, v.17, p.31-40, 1999.
- BARBOSA, J.C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **Experimentação agrônômica & Agroestat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Gráficas Multipress Ltda, 2016. 396p.
- BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M. C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p.(Boletim Técnico v.78).

BELLALLOUI, N.; TURLEY, R.B.; STETINA, S.R. Water stress and foliar boron application altered cell wall boron and seed cutrution in near-isogenic cotton lines expressing fuzzy and fuzzless seed phenotypes. **Plos One**, v.10, n.6, p.e0130.759, 2015.

BOGIANI, J.C.; ROSOLEM, C.A. Compared boron uptake and translocation in cotton cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p.1.499–1.506, 2012.

BOGIANI, J.C.; SAMPAIO, T.F.; ABREU-JÚNIOR, C.H.; ROSOLEM, C.A. Boron uptake and translocation in some cotton cultivars. **Plant and Soil**, v.375, n.1–2, p.241–253, 2014.

DELL, B.; HUANG, L. Physiological response of plants to low boron. **Plant and Soil**, v.193, n.2, p.103-120, 1997.

DEMIRAY, H.; DEREBOYLU, A.E. Effects of excess and deficient boron and niacin on the ultrastructure of root cells in *Dacus carota* cv Nantes. **Turkish Journal of Botany**, v.37, n.1, p.160-166, 2014.

DORDAS, C. Foliar boron application affects lint and seed yield and improves seed quality of cotton grown on calcareous soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.76, n.1, p.19–28, 2006.

GOLDBACH, H.E.; YU, Q.; WINGENDER, R.; SCHULZ, M.; WIMMER, M.; FINDEKLEE, P.; BALUSKA, F. Rapid response reactions of roots to boron deprivation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.164, n.2, p.173–181, 2001.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. **The water-culture method for growing plants without soil**. California: California Agricultural experiment Station, 1950. 32p. (Circular v. 247).

KOUCHI, H.; KUMAZAWA, K. Anatomical responses of root tips to boron deficiency. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.22, n.1, p.53–71, 1976.

LOOMIS, W.D.; DURST, R.W. Chemistry and biology of boron. **BioFactors**, v.3, n.4, p.229–239, 1992.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Berne: International Potash Institute, 1978. p.250.

MIWA, K.; WAKUTA, S.; TAKADA, S.; IDE, K.; TAKANO, J.; NAITO, S.; OMORI, H.; MATSUNAGA, T.; GUJIWARA, T. Roles of BOR2, a boron exporter in cross linking of rhamnogalacturona II and root elongation under boron limitation in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, v.163, n.4, p.1.699-1.709, 2013.

NABLE, R.O.; BAÑUELOS, G.S.; PAULL, J.G. Boron toxicity. **Plant and Soil**, v.193, p.181–198, 1997.

OLIVEIRA, R.H.; DIAS MILANEZ, C.R.; MORAES-DALLAQUA, M.A.; ROSOLEM, C.A. Boron deficiency inhibits petiole and peduncle cell development and reduces growth of cotton. **Journal of Plant Nutrition**, v.29, n.11, p.2.035–2.048, 2006.

OOSTERHUIS, D.M.; ZHAO, D. Effect of boron deficiency on the growth and carbohydrate metabolism of cotton. In: WELCH, R. M. (Ed.) **Plant Nutrition**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. p.166-167.

PRADO, R.M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. p.25.

REID, R. **Update on boron toxicity and tolerance in plants**. Dordrecht: Springer, 2007. p.83-90.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: A modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.4, n.3, p.289–302, 1981.

SWIADER, J.M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F.G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids . **Journal of Plant Nutrition**, v.17, n.10, p.1.687–1.699, 1994.

YAU, S.K.; NACHIT, M.M.; RYAN, J.; HAMBLIN, J. Phenotypic variation in boron-toxicity tolerance at seedling stage in durum wheat (*Triticum durum*). **Euphytica**, v.83, n.3, p.185–191, 1995.

CAPÍTULO 4 – Silício via foliar e radicular em plantas de algodão sob diferentes estados nutricionais de boro

Resumo

O silício pode aliviar estresses por desordens nutricionais de boro, mas não são conhecidos esses efeitos na cultura do algodão. Objetivou-se verificar o efeito do silício, aplicado via foliar e radicular, em mitigar os efeitos deletérios da deficiência e da toxicidade de boro no algodoeiro. Foi desenvolvido experimento com plantas de algodão cultivar Bayer FM 910® (transgênico) em sistema de cultivo sem solo, em vasos com 6 dm³. O delineamento experimental utilizado foi em blocos inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x3, com três tratamentos: controle (sem silício), silício via radicular e silício via foliar; e três estados nutricionais de boro: deficiente, suficiência e toxicidade, em quatro repetições. Na fase reprodutiva B1 das plantas, foram realizadas avaliações biológicas (altura, número de folhas, área foliar, matéria seca e acúmulo de Si e B). Na quinta folha totalmente expandida, foram avaliadas a fluorescência inicial, máxima e a eficiência quântica do fotossistema II, bem como o teor de clorofila a, clorofila b e total. O silício mitiga desordem nutricional de boro em algodoeiro, destacando-se a aplicação foliar e a radicular para aliviar os efeitos deletérios de deficiência e de toxicidade de B, respectivamente.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L., elemento benéfico, micronutriente, nutrição boratada, adubação foliar, desordem nutricional.

Introdução

A produção do algodoeiro é limitada devido à deficiência de boro, fato amplamente relatado por diversos autores (BOGIANI; ROSOLEM, 2012; AHMED et al., 2013; BOGIANI et al., 2014); portanto, é comum a resposta da cultura à fertilização boratada (BELLALOUI; TURLEY; STETINA, 2015).

O suprimento adequado de boro, para o algodoeiro, incrementa o desenvolvimento das plantas de algodão (ARAÚJO; SILVA, 2012); no entanto, o excesso do micronutriente pode induzir à toxicidade (AHMED et al., 2013).

Nesse cenário de estresse abiótico por desordem nutricional que pode ocorrer no cultivo do algodoeiro em qualquer região, tem-se a opção do emprego do silício (Si).

O Si é um elemento benéfico, conhecido por aliviar estresses de diferentes naturezas. Estudos demonstram que o Si incrementa a eficiência quântica do fotossistema II (SOUZA FERRAZ et al., 2014) e a produção de clorofila em plantas de algodão (FAROOQ et al., 2013), o que pode favorecer a fotossíntese e induzir alívio em estresses.

Outra forma de o Si aliviar estresse, como toxicidade de B verificado em espinafre (GUNES et al., 2007a), sorgo (INAL; PILBEAM; GUNES, 2009) e trigo (GUNES et al., 2007b), seria devido à formação de complexos de borossilicato no solo e/ou no interior das plantas, o que diminui a absorção radicular de B e o transporte, aliviando os danos tóxicos do elemento. No entanto, em plantas sob estresse por deficiência de B, os efeitos do Si não são conhecidos.

Para garantir adequada nutrição silicatada no algodoeiro, pode ser aplicado Si via radicular ou foliar. Como a planta de algodão tem limitação de absorção radicular do Si por ser cultura considerada intermediária para acúmulo do elemento benéfico (MA; TAKAHASHI, 2002; HODSON et al., 2005), o fornecimento do elemento via foliar é uma alternativa, apesar de desconhecida sua relação com a desordem nutricional boratada.

Para avançar nos estudos que poderiam indicar a possibilidade de uso do Si para mitigar desordem nutricional boratada, é pertinente testar a hipótese de que o

silício, aplicado via foliar e/ou radicular, pode mitigar os efeitos deletérios da deficiência e da toxicidade de boro no algodoeiro.

Objetivou-se verificar o efeito do silício, aplicado via foliar e radicular, em mitigar os efeitos deletérios da deficiência e da toxicidade de boro no algodoeiro.

Material e métodos

O experimento foi desenvolvido com algodão transgênico (Bayer FM 910®), cultivado em sistema de cultivo sem solo, em casa de vegetação. Durante o período experimental, a umidade relativa do ar, a temperatura máxima e a temperatura mínima foram registradas com um termo-hidrômetro (Figura 1).

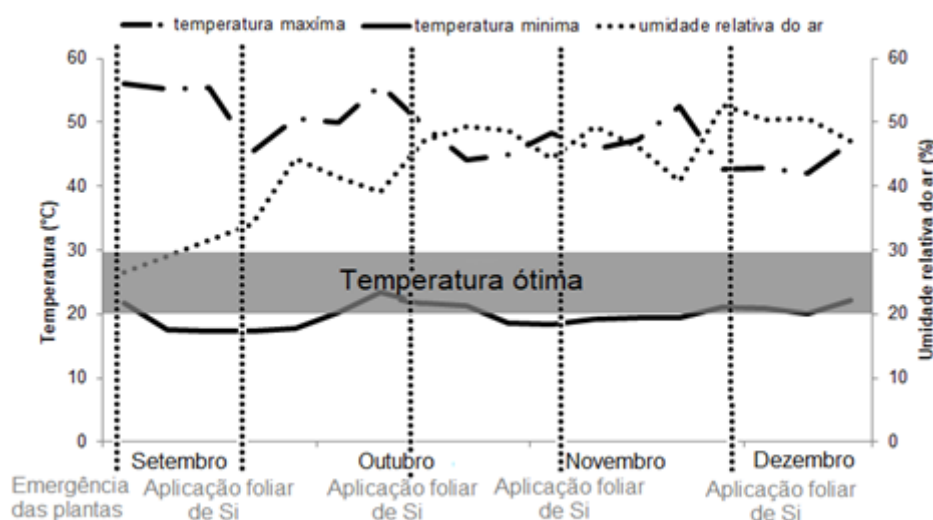


Figura 1. Temperatura mínima, máxima e umidade relativa do ar durante período experimental (setembro/2017 a dezembro/2017), no interior da casa de vegetação.

Estes dados indicam ampla variação na umidade relativa média do ar ($40,4 \pm 13,6\%$), na temperatura mínima ($21,6 \pm 4,3^\circ\text{C}$) e na temperatura máxima ($45,5 \pm 11,9^\circ\text{C}$) durante o período experimental (Figura 1). Observou-se possível estresse térmico nas plantas, considerando que a temperatura média para crescimento ótimo do algodão está entre 20° e 30°C (SNIDER; KAWAKAMI, 2014).

O delineamento experimental utilizado foi em blocos inteiramente casualizados, em esquema fatorial 3×3 , sendo três tratamentos de silício: controle (sem silício), silício via radicular e silício via foliar; e três estados nutricionais de boro sob deficiência, suficiência e toxicidade, e em quatro repetições.

Para a aplicação de Si, foi utilizada a fonte silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol (107 g L^{-1} de Si; $34,7 \text{ g L}^{-1}$ de K_2O e pH 11,8), devido ao bom desempenho da mesma, relatado no capítulo 2. Para o tratamento via radicular, foi fornecido Si na concentração de 2 mmol L^{-1} adicionada junto à solução nutritiva de Hoagland e Arnon(1950) sem B, e para o tratamento via foliar na concentração de $0,8 \text{ g L}^{-1}$, sendo esta a concentração que resultou em maior acúmulo e produção de massa seca em plantas de algodão, relatado no capítulo 2.

Foram realizadas quatro aplicações foliares de Si nos estágios vegetativos: V3, V5, V7 e V9, tendo as plantas com três, cinco, sete e nove folhas completamente desenvolvidas, respectivamente. A temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e a umidade relativa do ar (%) foram medidas durante a primeira, segunda, terceira e quarta pulverizações foliares, obtendo os seguintes valores: 23,4 e 79; 17,8 e 66; 21,5 e 65; 22,5 e 60, respectivamente.

A calda de pulverização teve valor pH ajustado entre 6,0 e 7,0, o que poderia favorecer compatibilidade química se misturada com defensivos. A aplicação foliar do Si foi realizada imediatamente após o preparo da calda, sendo utilizado pulverizador manual, visando à cobertura total da parte aérea. O volume de calda aplicado variou de acordo com o tamanho das plantas, sendo aplicados 2,0 mL de calda na primeira e na segunda aplicações e 4,0 mL na terceira e na quarta aplicações. Durante as aplicações foliares, a superfície do substrato foi coberta com algodão para evitar escorrimento da solução pulverizada para o substrato, de modo a se garantir que a absorção de Si, no tratamento do Si foliar, fosse totalmente via foliar. Foram realizadas aplicações com cloreto de potássio para equilibrar a quantidade de potássio entre os tratamentos.

O boro foi fornecido na forma de ácido bórico junto à solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) sem boro, nas concentrações de 33,7; 83,6 e $130,5 \mu\text{mol L}^{-1}$ para os estados nutricionais de deficiência moderada, suficiência e toxicidade moderada, respectivamente, relatado no capítulo 3. Foi utilizada água destilada e duplamente deionizada para o preparo da solução nutritiva, visando a diminuir a contaminação com boro.

Quando 50% das plantas atingiram estágio reprodutivo B1, o experimento foi finalizado, sendo realizadas avaliações biométricas referentes à altura, medindo-se

do colo da planta até ao primeiro nó vegetativo; número de folha; e área foliar mensurada com aparelho Li – 3100 AreaMeter®.

Na quarta folha totalmente expandida, foram avaliadas a fluorescência inicial (Fo), a fluorescência máxima (Fm) e a eficiência quântica do fotossistema II (EQFSII), medidas com fluorômetro (Opti-sciences® - Os30P+), bem como o teor de clorofila a, clorofila b e clorofila total (clorofila a + b), pelo método descrito por Lichtenthaler (1987).

A parte aérea foi coletada e separada das raízes, sendo ambas lavadas com água deionizada, solução a 0,1% de detergente, solução a 0,1% de HCl e água deionizada, acondicionadas em sacos de papel e, então, acondicionadas para secar em estufa de circulação forçada de ar a $65^{\circ}\text{C} \pm 5$, até se obter estabilidade da massa seca. Após secas, foram pesadas e, posteriormente, moídas em moinho tipo Wiley, para a determinação do teor de Si da parte aérea e da raiz segundo método descrito por Korndörfer, Pereira e Nola (2004), e do teor de B, segundo método descrito por Bataglia et al. (1978). A partir do teor de Si, de B e da massa seca da parte aérea, da raiz e da planta inteira, calculou-se o acúmulo de Si e de B nas mesmas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, e ao teste de comparação de médias t de Student (LSD), a 5% de probabilidade. Em adição, foi realizado estudo de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas, utilizando-se do software estatístico AgroEstat® (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2010).

Resultados e Discussão

O acúmulo de B na parte aérea de plantas de algodão foi dependente da aplicação de Si, sendo os menores valores observados no estado nutricional de deficiência de B, comparado à suficiência e à toxicidade de B (Figura 2a). Observou-se que a aplicação de Si foliar no estado nutricional sob suficiência se destacou, favorecendo o acúmulo deste micronutriente na parte aérea das plantas de algodão (Figura 2a).

A aplicação de Si radicular destacou-se da aplicação foliar na diminuição do acúmulo de B na parte aérea das plantas sob toxicidade do micronutriente (Figura 2a). Este resultado pode ser atribuído à possível formação de complexos borossilicato, o qual dificulta a absorção de boro pelo algodoeiro e o transporte a longa distância deste micronutriente, fato observado por Gunes et al. (2007a) em espinafre e por Mehrabanjoubani et al. (2015) em algodão.

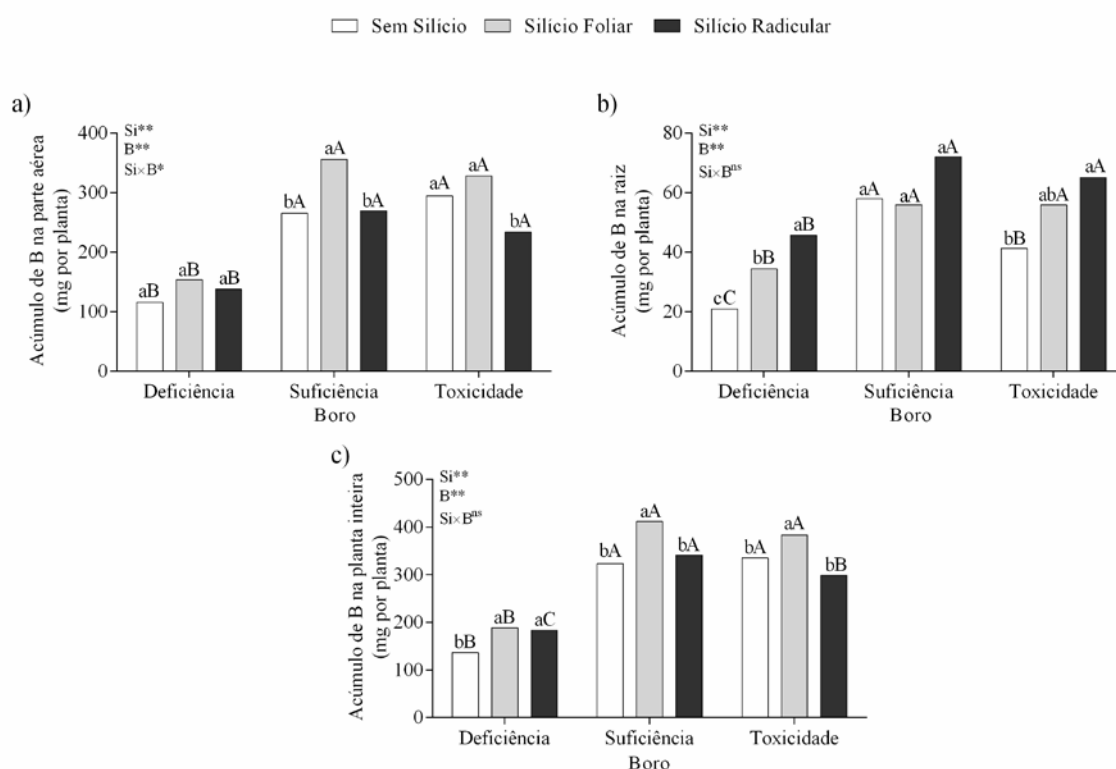


Figura 2. Acúmulo de boro na parte aérea (a), raiz (b) e planta inteira (c) de algodão cultivadas em diferentes estados nutricionais de boro sem silício e na presença de silício aplicado via foliar e radicular. ** - significativo a 1% pelo teste t Student entre os tratamentos com Si, dentro do mesmo estado nutricional em boro; letras maiúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes estados nutricionais em boro, dentro dos tratamentos com Si; e letras minúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes aplicações de Si, dentro dos tratamentos com B, ambos segundo teste t Student, a 5% de probabilidade.

A aplicação radicular de Si em relação à foliar favoreceu o acúmulo de B na raiz, nas plantas sob deficiência do micronutriente (Figura 2b); no entanto, o Si, fornecido via radicular ou foliar, também incrementou o acúmulo de B nas plantas sob toxicidade do micronutriente (Figura 2b).

O acúmulo de B na planta inteira foi favorecido pela aplicação de Si foliar nas plantas sob suficiência e toxicidade do micronutriente (Figura 2c). Nas plantas sob deficiência de B, o emprego do Si, aplicado via foliar ou radicular, aumentou o acúmulo do micronutriente (Figura 2c).

A aplicação de silício favoreceu seu acúmulo na parte aérea (Figura 3a) e na raiz (Figura 3b) de plantas de algodão, sendo dependente do estado nutricional estudado. O Si aplicado via foliar favoreceu o acúmulo do mesmo na parte aérea, em plantas de algodão sob deficiência, suficiência e toxicidade de B (Figura 3a).

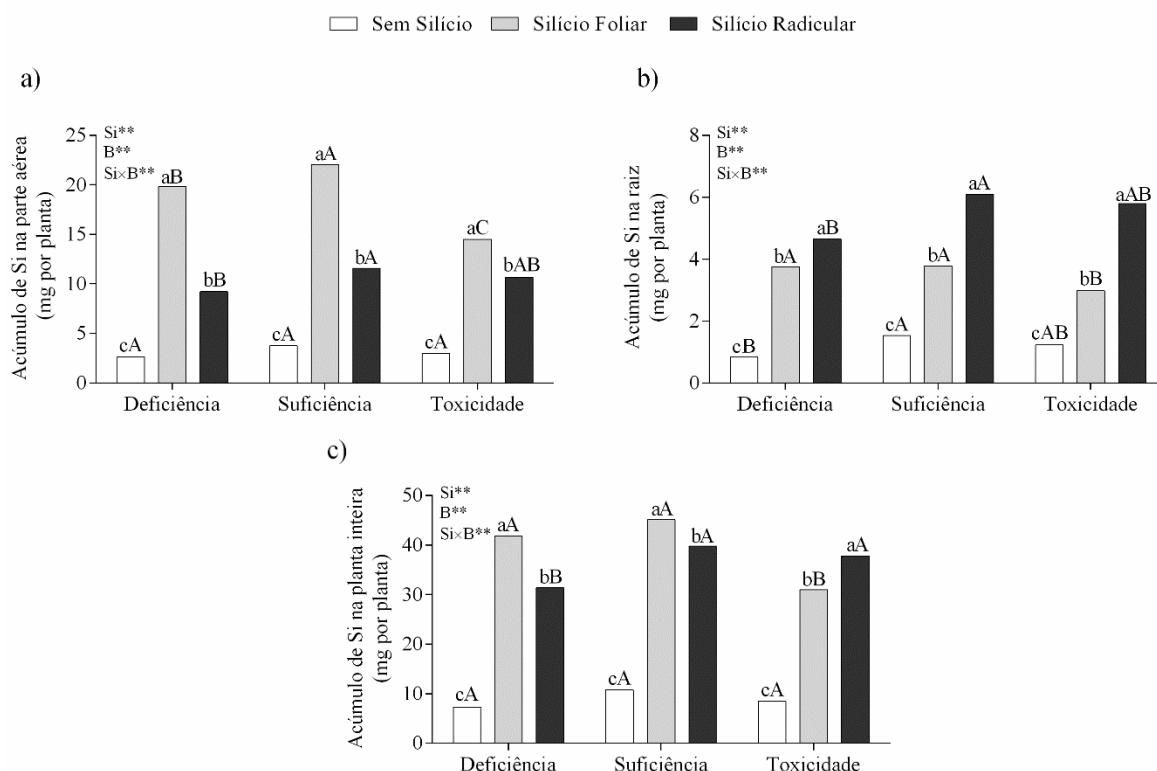


Figura 3. Acúmulo de silício na parte aérea (a), raiz (b) e na planta (c) de algodão cultivadas em diferentes estados nutricionais de boro, sem silício e na presença de silício aplicado via foliar e radicular. ** - significativo a 1% pelo teste t Student entre os tratamentos com Si, dentro do mesmo estado nutricional em boro; letras maiúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes estados nutricionais em boro dentro dos tratamentos com Si; e letras minúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes aplicações de Si, dentro dos tratamentos com B, ambos segundo teste t Student, a 5% de probabilidade.

O acúmulo de Si na raiz foi favorecido pela aplicação de Si radicular nas plantas de algodão sob deficiência, suficiência e toxicidade (Figura 3b). Isto se deve ao fato de que, após absorvido via radicular, parte do Si concentra-se nas raízes,

na parte externa da epiderme do algodoeiro (MEHRABANJOUBANI et al., 2015) e apenas uma pequena parte é transportada para a parte aérea (LE et al., 2014). Por outro lado, o Si concentra-se nas folhas, após absorvido via foliar, devido à baixa redistribuição do mesmo nas plantas (MA; TAKAHASHI, 2002).

O acúmulo de Si na planta inteira foi favorecido pela aplicação de Si, dependendo do estado nutricional de B estudado (Figura 3c). A aplicação de Si foliar resultou em maior acúmulo de Si na planta inteira, quando sob deficiência e suficiência do micronutriente (Figura 3c), enquanto o acúmulo de Si na planta inteira, sob toxicidade de B, foi favorecido pelo Si aplicado via radicular (Figura 3c).

O tratamento controle (sem Si) apresentou o menor acúmulo de Si em todos os estados nutricionais de B, indicando que não houve contaminação com o mesmo, durante o período experimental (Figura 3c).

A produção de clorofila a (Figura 4a), clorofila b (Figura 4b) e clorofila total (Figura 4c) foi favorecida pela aplicação de Si, dependendo do estado nutricional no qual as plantas de algodão foram cultivadas. A menor produção de clorofila a (Figura 4a), clorofila b (Figura 4b) e clorofila total (Figura 4c) ocorreu na ausência de Si, quando em plantas de algodão cultivadas sob deficiência e suficiência de B. Isto indica possível estresse térmico, uma vez que o estado nutricional de B não afeta a produção de clorofila (DORDAS, 2006; AHMED et al., 2014), enquanto altas temperaturas podem induzir desnaturação de clorofilas, reduzindo o teor da mesma nas plantas (YAMANE et al., 1997).

A produção de clorofila a (Figura 4a), de clorofila b (Figura 4b) e clorofila total (Figura 4c) foi favorecida pela aplicação de Si foliar em plantas de algodão cultivada em estágio nutricional de deficiência e suficiência de B, enquanto a produção de clorofila a (Figura 4a) e clorofila total (Figura 4c), em plantas de algodão cultivadas em estágio nutricional sob toxicidade de B, foi favorecida pela aplicação radicular do elemento benéfico (Figura 4a).

Estes resultados podem estar associados ao efeito benéfico do Si em aumentar o aproveitamento da energia luminosa, aumentando a eficiência quântica do fotossistema II, e diminuindo as perdas de energia do fotossistema I, pela queda na fluorescência inicial, e do fotossistema II, pela queda da fluorescência máxima (SOUZA FERRAZ et al., 2014). O incremento na produção da clorofila em plantas

de algodão cultivadas sob toxicidade de B, ocasionado pela aplicação de Si radicular (Figura 4a), pode ser indicativo do efeito mitigador deste modo de aplicação de Si em plantas cultivadas em condição de toxicidade de B, não sendo este efeito benéfico verificado para a produção de clorofila b (Figura 4b).

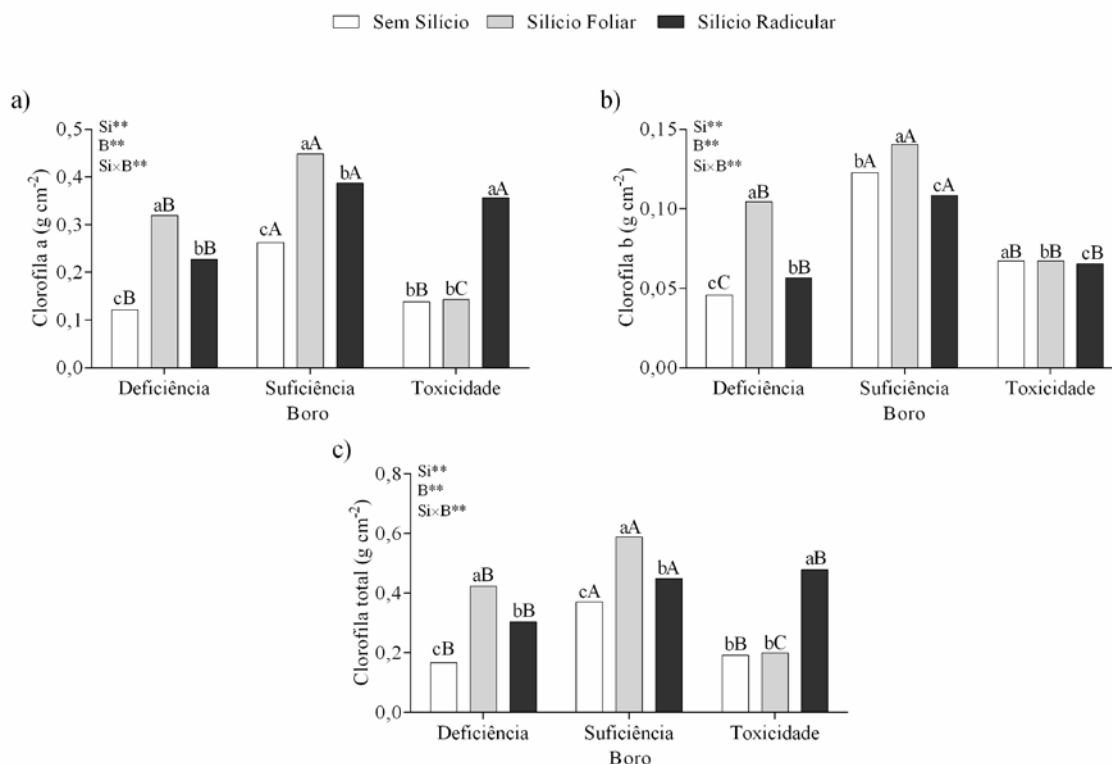


Figura 4. Teor de clorofila a (a), clorofila b (b) e clorofila total (c) de algodão cultivadas em diferentes estados nutricionais de boro sem silício e na presença de silício aplicado via foliar e radicular. ** - significativo a 1% pelo teste t Student entre os tratamentos com Si, dentro do mesmo estado nutricional em boro; letras maiúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes estados nutricionais em boro, dentro dos tratamentos com Si; e letras minúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes aplicações de Si, dentro dos tratamentos com B, ambos segundo teste t Student a 5%, de probabilidade.

A fluorescência inicial (F_o) (Figura 5a) e a fluorescência máxima (F_m) (Figura 5b) foram influenciadas pela aplicação de Si, dependentes do estágio nutricional aplicado, não sendo observada interação entre os tratamentos para a eficiência quântica do fotossistema II (Figura 5c).

A F_o está relacionada com a perda de energia do fotossistema I e do fotossistema II, sendo emitida pela clorofila a e pelo sistema coletor de luz do fotossistema II (NETTO et al., 2005). O tratamento controle (sem Si), em plantas de

algodão sob deficiência e toxicidade, apresentou os maiores resultados para a Fo (Figura 5a), indicando maior quantidade de energia luminosa sendo perdida na forma de fluorescência, em detrimento da fotossíntese. A aplicação de Si destacou-se, diminuindo a Fo em plantas de algodão cultivadas sob deficiência de B, independentemente do modo de aplicação, radicular ou foliar. Entretanto, em plantas de algodão sob toxicidade do micronutriente, o Si aplicado via foliar destacou-se, pela redução da Fo (Figura 5a).

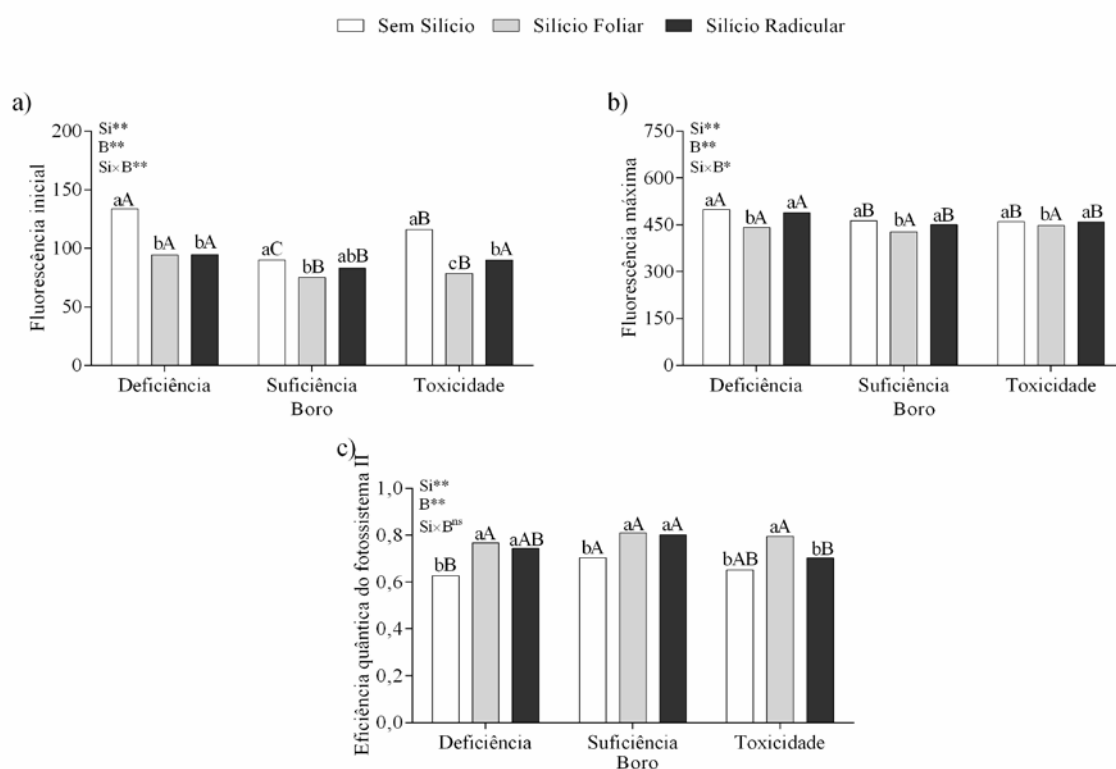


Figura 5. Fluorescência inicial (a), fluorescência máxima (b) e eficiência quântica do fotossistema II (c) de plantas de algodão cultivadas em diferentes estados nutricionais de boro sem silício e na presença de silício aplicado via foliar e radicular. **, * e ^{ns} - significativo a 1%, 5% e não significativo, pelo teste t Student, entre os tratamentos com Si, dentro do mesmo estado nutricional em boro; letras maiúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes estados nutricionais em boro, dentro dos tratamentos com Si; e letras minúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes aplicações de Si, dentro dos tratamentos com B, ambos segundo teste t Student, a 5% de probabilidade

A fluorescência máxima (Fm) é inversamente proporcional à maior eficiência no processo de fotorredução da quinona “a”, o que indica bom funcionamento do fotossistema II nas membranas do tilacoide, refletindo diretamente o fluxo de

elétrons entre fotossistema I e II (SILVA et al., 2006). O Si aplicado via foliar desfavoreceu a Fm em plantas de algodão sob deficiência, suficiência e toxicidade de B (Figura 5b), favorecendo a eficiência quântica do fotossistema II (EQFSII), uma vez que esta é calculada como sendo a razão entre a fluorescência máxima (Fm) e a fluorescência variável (Fm/Fv).

A aplicação de Si favoreceu a EQFSII em plantas de algodão sob deficiência e suficiência, independentemente do modo de aplicação (Figura 5c). Entretanto, em plantas de algodão sob toxicidade de B, o Si foliar destacou-se com maior incremento na EQFSII, em comparação ao Si aplicado via radicular (Figura 5c). O efeito benéfico do Si aplicado via foliar em plantas de algodão, incrementando a EQFSII que indica alta eficiência fotossintética, também foi verificado por Souza Ferraz et al. (2014).

As plantas de algodão sob deficiência e toxicidade de B apresentaram menor altura, comparadas às plantas de algodão sob suficiência de B, independentemente da aplicação de Si (Figura 6a).

A altura das plantas de algodão cultivadas em deficiência de B é prejudicada, possivelmente, pelo efeito deletério desta desordem nutricional na síntese de RNA e, por consequência, na síntese proteica, afetando a divisão e a diferenciação celular, e, por consequência, o crescimento das partes jovens das plantas (MENGEL; KIRKBY, 1978) e pelo importante papel do B na estrutura da parede celular, prejudicando o desenvolvimento vegetal (DEMİRAY; DEREBOYLU, 2014).

Quando em excesso, tem-se diminuição da altura das plantas de algodão (Figura 6a), fato também observado por Ahmed et al. (2013). Isto ocorre, provavelmente, devido ao fato de que o B em excesso causa distúrbios metabólicos na formação de complexos com NAD⁺ dos ribossomos, afetando a formação da estrutura do RNA (LOOMIS; DURST, 1992).

As plantas de algodão sob suficiência de B apresentaram maior número de folhas, independentemente da aplicação de Si (Figura 6b). A aplicação de Si favoreceu o número de folhas, não diferenciando entre os modos de aplicação do elemento, em plantas de algodão sob deficiência e toxicidade de B (Figura 6b).

Este efeito benéfico do Si no número de folhas nas plantas sob toxicidade de B deve-se, provavelmente, ao fato de que o Si aplicado via radicular diminui o

acúmulo de B na parte aérea de plantas de algodão (Figura 2a). Nas plantas sob deficiência de B, a menor produção de folhas deve-se ao papel deste elemento na produção de RNA e, conseqüentemente, na síntese de proteínas, bem como na integridade da parede celular (MENGEL; KIRKBY, 1978; DEMİRAY; DEREBOYLU, 2014).

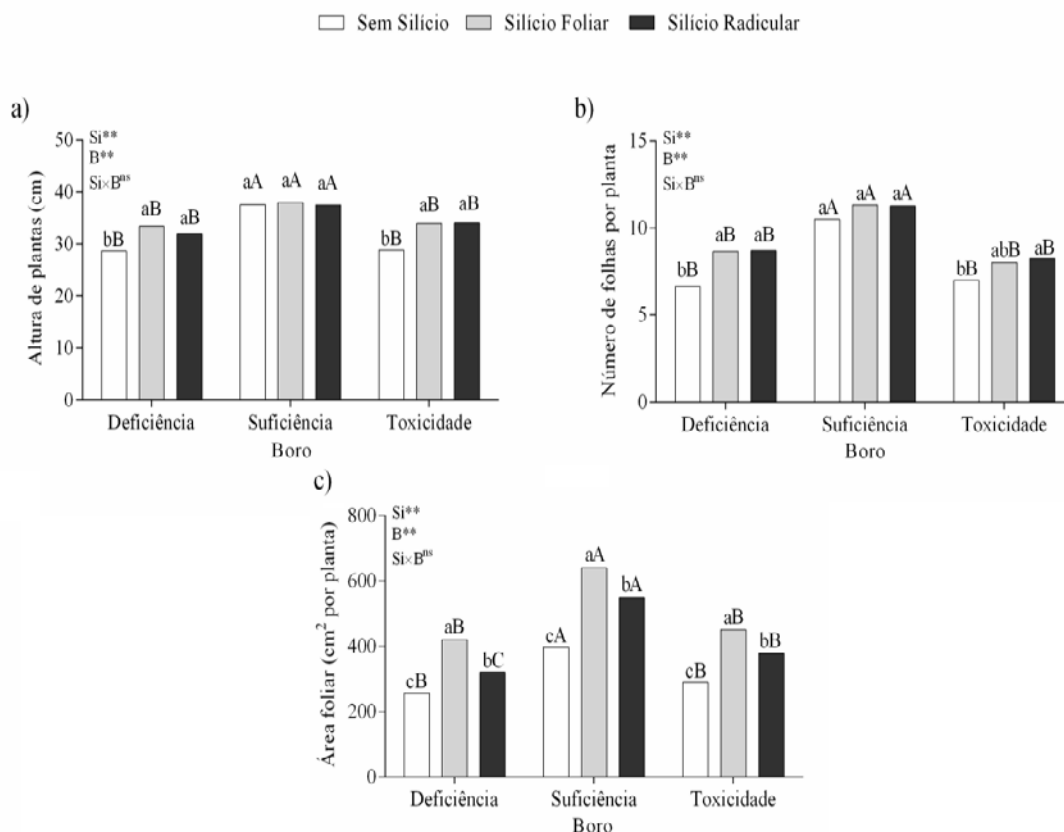


Figura 6. Altura (a), número de folhas por planta (b) e área foliar (c) de plantas de algodão cultivadas em diferentes estados nutricionais de boro sem silício e na presença de silício aplicado via foliar e radicular. ** e ^{ns} - significativo a 1%, não significativo pelo teste t Student entre os tratamentos com Si, dentro do mesmo estado nutricional em boro; letras maiúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes estados nutricionais em boro, dentro dos tratamentos com Si; e letras minúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes aplicações de Si, dentro dos tratamentos com B, ambos segundo teste t Student, a 5% de probabilidade.

De forma análoga ao número de folhas, as plantas de algodão sob suficiência de B apresentaram maior área foliar, independentemente da aplicação de Si (Figura 6c). O Si aplicado via foliar promoveu maior área foliar nas plantas em deficiência, suficiência e toxicidade de B (Figura 6c).

A aplicação de Si favoreceu a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) em plantas de algodão, dependendo do estado nutricional das mesmas (Figura 7a). O Si aplicado via foliar favoreceu a produção de MSPA em plantas de algodão sob deficiência, suficiência e toxicidade do micronutriente, enquanto o Si aplicado via radicular favoreceu a produção de MSPA em plantas de algodão sob suficiência e toxicidade de B (Figura 7a).

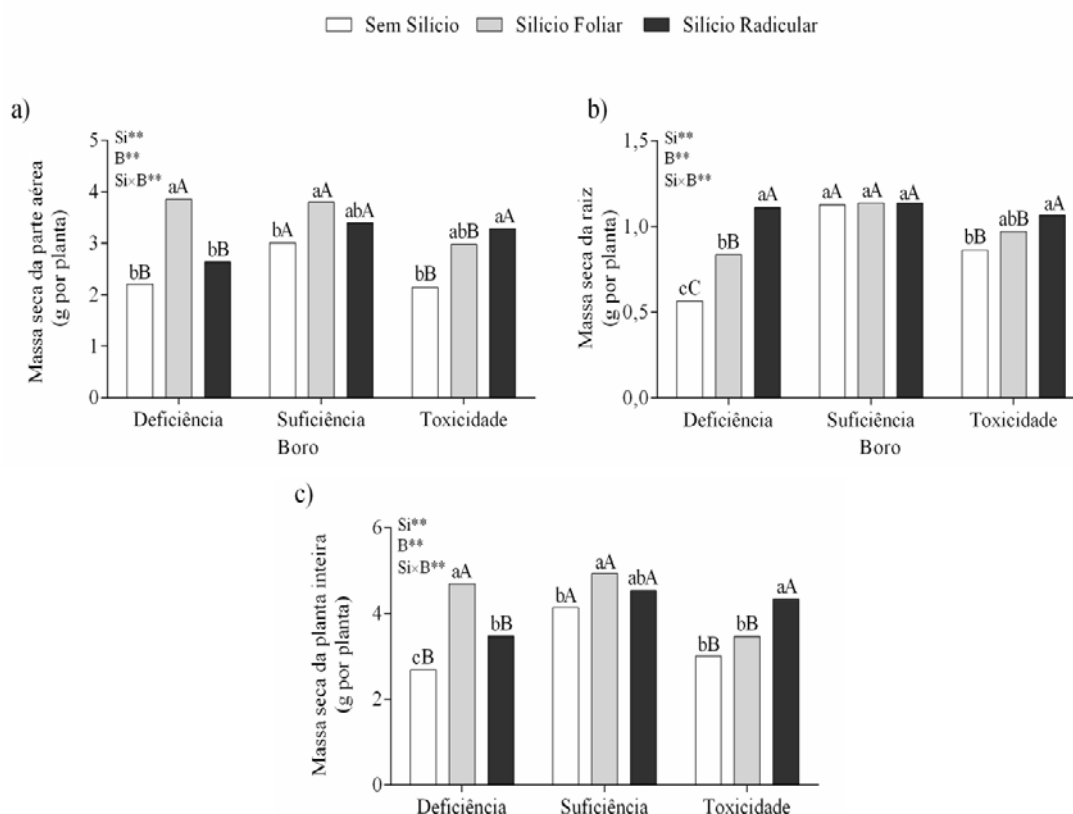


Figura 7. Massa seca da parte aérea (a), raiz (b) e planta inteira (c) de plantas de algodão cultivadas em diferentes estados nutricionais de boro sem silício e na presença de silício aplicado via foliar e radicular. ** - significativo a 1% pelo teste t Student entre os tratamentos com Si, dentro do mesmo estado nutricional em boro; letras maiúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes estados nutricionais em boro, dentro dos tratamentos com Si; e letras minúsculas diferem entre os tratamentos com diferentes aplicações de Si, dentro dos tratamentos com B, ambos segundo teste t Student, a 5% de probabilidade.

A produção de massa seca da raiz (MSR) de plantas de algodão sob deficiência, suficiência ou toxicidade de B foi dependente do modo de aplicação de Si (Figura 7b). As plantas de algodão sob suficiência de B apresentaram maior produção de MSR, nos tratamentos sem Si e Si via foliar, comparadas às plantas sob deficiência e toxicidade de B (Figura 7b). Nas plantas de algodão sob

deficiência de B, houve prejuízo na produção da MSR devido ao impedimento da atividade meristemática, com declínio na divisão celular (LEE; ARONOFF, 1967), induzindo a inibição do processo de alongação das raízes (MARSCHNER; MARSCHNER, 1995), havendo menor comprimento das raízes (OLIVEIRA et al., 2006; BOGIANI; ROSOLEM, 2012).

A aplicação de Si favoreceu a produção de MSR de plantas de algodão, sem diferenciar do modo de aplicação para as plantas sob toxicidade de B e com destaque para o Si aplicado via foliar para as plantas sob deficiência de B (Figura 7b).

O modo de aplicação de Si favoreceu a produção de massa seca na planta inteira (MSPI), dependendo do estado nutricional de deficiência, suficiência e toxicidade de B (Figura 7c). As plantas de algodão sob suficiência de B e sem adição de Si apresentaram maior produção de MSPI comparadas às plantas sob deficiência e toxicidade de B (Figura 7c).

O Si aplicado via foliar aliviou os danos causados pela deficiência de B em plantas de algodão, favorecendo a produção de MSPI (Figura 7c). Este incremento na produção de MSPI pela aplicação de Si foliar nas plantas sob deficiência de B esteve correlacionado ao acúmulo de Si na parte aérea ($r=0,78^{**}$), altura ($r=0,58^*$), MSPA ($r=0,99^{**}$) e MSR ($r=0,69^*$).

Por outro lado, a produção de MSPI de algodão, em estado nutricional de toxicidade de B, foi favorecida pela aplicação de Si radicular (Figura 7c). Este incremento na produção de MSPI de plantas de algodão em estado nutricional de toxicidade de B, devido à aplicação de Si radicular, apresentou correlação com a MSPA ($r=0,99^{**}$), MSR ($r=0,61^*$), altura ($r=0,58^*$) e acúmulo de Si na parte aérea ($r=0,59^*$) e na raiz ($r=0,78^*$).

Foi observado diferença visual no desenvolvimento das plantas de algodão, indicando maior altura das plantas na presença do Si em relação à ausência do mesmo, quando submetida ao estresse por toxicidade de B (Figura 8a) ou por deficiência de B (Figura 8c), não havendo essa diferença das plantas sob suficiência de B (Figura 8b).

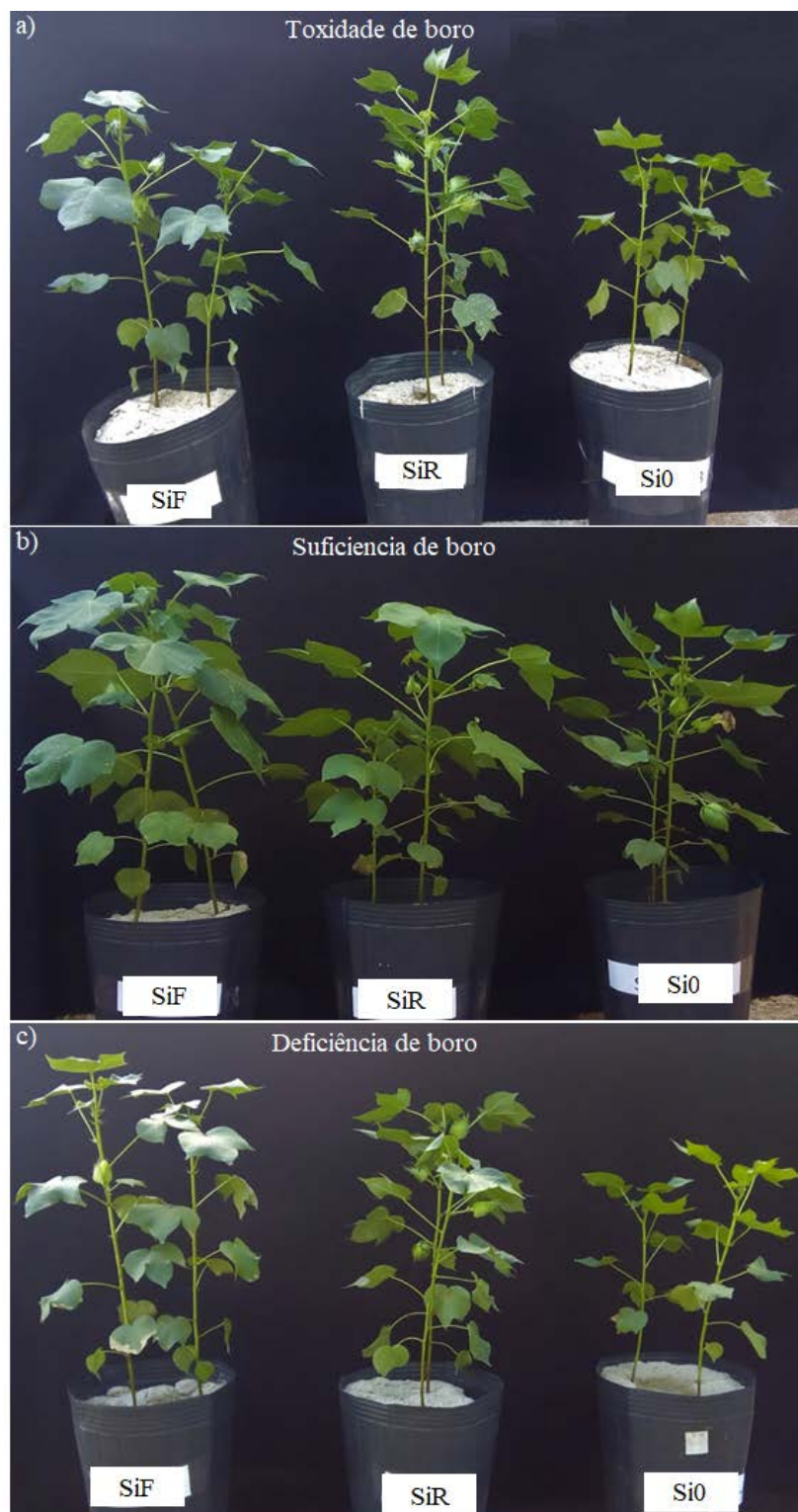


Figura 8. Aspecto visual das plantas de algodão (estádio fenológico F9) em função da aplicação de silício via foliar (SiF), via radicular (SiR) e sem Si (Si0), sob diferentes estados nutricionais de boro (toxidade, suficiência e deficiência).

Cabe destacar que, nas plantas sob toxicidade de B sem Si (Figura 8a), nota-se que as folhas, especialmente as mais velhas, estão cloróticas e com aspecto de murcha em relação às folhas das plantas com Si (SiF e SiR). Este aspecto da toxicidade de B em plantas de algodão, indicando folhas velhas cloróticas (amareladas), foi descrito por outros autores na cultura (LOOMIS; DURST, 1992; NABLE; BAÑUELOS; PAULL, 1997; BROWN et al., 2002; REID, 2007; AHMED et al., 2013).

Ressalta-se que o efeito do Si via radicular ou foliar foi visual nas plantas sob desordem nutricional do B, indicando benefício deste elemento no alívio do estresse nutricional nas plantas de algodão. Portanto, esse efeito visual do Si no estresse nutricional ilustra bem esses efeitos nas variáveis biométricas avaliadas e discutidas anteriormente.

Conclusão

O silício mitiga desordem nutricional de boro em algodoeiro, destacando a aplicação foliar e a radicular para aliviar os efeitos deletérios de deficiência e toxicidade de B, respectivamente.

Referências

AHMED, N.; ABID, M.; RASHID, A.; ABOU-SHANAB, R.; AHMAD, F. Influence of Boron nutrition on membrane leakage, chlorophyll content and gas exchange characteristics in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Journal of Plant Nutrition**, v.37, n.14, p.2.302–2.315, 2014.

AHMED, N.; ABID, M.; RASHID, A.; ALI, M.A.; AMMANULLAH, M. Boron requirement of irrigated cotton in a typic haplocambid for optimum productivity and seed composition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.44, n.8, p.1.293–1.309, 2013.

ARAÚJO, É.O.; SILVA, M.A.C. Interação boro e zinco no crescimento, desenvolvimento e nutrição do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, p.720–727, 2012.

BARBOSA, J.C.; MALDONADO JÚNIOR, W.. **Experimentação agrônômica & Agroestat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos. Jaboticabal: Multipress, 2016. 396p.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico. 1983, p.48. (Boletim Técnico, v.78).

BELLALLOUI, N.; TURLEY, R.B.; STETINA, S.R. Water stress and foliar boron application altered cell wall boron and seed nutrition in near-isogenic cotton lines expressing fuzzy and fuzzless seed phenotypes. **Plos One**, v.10, n.6, p.e0130.759, 2015.

BOGIANI, J.C.; ROSOLEM, C.A. Compared boron uptake and translocation in cotton cultivars. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.5, p.1.499–1.506, 2012.

BOGIANI, J.C.; SAMPAIO, T.F.; ABREU-JUNIOR, C.H.; ROSOLEM, C.A. Boron uptake and translocation in some cotton cultivars. **Plant and Soil**, v.375, n.1–2, p.241–253, 2014.

BROWN, P.; BELLALLOUI, N.; WIMMER, M.; BASSIL, E.S.; RUIZ, J.; HU, H.; PFEFFER, H.; DENNEL, D.; ROMHELD, V. Boron in plant biology. **Plant Biology**, v.4, p.205–223, 2002.

DEMİRAY, H.; DEREBOYLU, A.E. Effects of excess and deficient boron and niacin on the ultrastructure of root cells in *Daucus carota* cv. Nantes. **Turkish Journal of Botany**, v.37, n.1, p.160–166, 2014.

DORDAS, C. Foliar boron application affects lint and seed yield and improves seed quality of cotton grown on calcareous soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.76, n.1, p.19–28, 2006.

FAROOQ, M.A.; ALI, S.; HAMEED, A.; ISHAQUE, W.; MAHMOOD, K.; IQBAL, Z. 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**, v.96, p.242–249, 2013.

GUNES, A.; INAL, A.; BAGCI, E.G.; COBAN, S.; PILBEAM, D.J. Silicon mediates changes to some physiological and enzymatic parameters symptomatic for oxidative stress in spinach (*Spinacia oleracea* L.) grown under B toxicity. **Scientia Horticulturae**, v.113, n.2, p.113–119, 2007a.

GUNES, A.; INAL, A.; BAGCI, E.G.; COBAN, S.; SAHIN, O. Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. **Biologia Plantarum**, v.51, n.3, p.571–574, 2007b.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. **The water-culture method for growing plants without soil**. California: California Agricultural experiment Station, 1950. 32p. (Circular v. 247).

HODSON, M.J.; WHITE, P.J.; MEAD, A.; BROADLEY, M.R. Phylogenetic Variation in the Silicon Composition of Plants. **Annals of Botany**, v.96, n.6, p.1.027–1.046, 2005.

INAL, A.; PILBEAM, D.J.; GUNES, A. Silicon increases tolerance to boron toxicity and reduces oxidative damage in barley. **Journal of Plant Nutrition**, v.32, n.1, p.112–128, 2009.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; NOLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia:UFU, 2004. 34p. (Boletim Técnico v.2.).

LE, V.N.; RUI, Y.; GUI, X.; LI, X.; LIU, S.; HAN, Y. Uptake, transport, distribution and Bio-effects of SiO₂ nanoparticles in Bt-transgenic cotton. **Journal of Nanobiotechnology**, v.12, n.1, p.50-65, 2014.

LEE, S.; ARONOFF, S. Boron in plants: A biochemical role. **Science**, v.158, n.3.802, p.798–799, 1967.

LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology**, v.148, n.C, p.350–382, 1987.

LOOMIS, W.D.; DURST, R.W. Chemistry and biology of boron. **BioFactors**, v.3, n.4, p.229–239, 1992.

MA, J.F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Amsterdam: Elsevier, 2002. p.63 - 106.

MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. p.191 - 243.

MEHRABANJOUBANI, P.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H.R.; AGHDASI, M. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants. **Pedosphere**, v.25, n.2, p.192–201, 2015.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. Berne: International Potash Institute, 1978. p.250.

NABLE, R.O.; BAÑUELOS, G.S.; PAULL, J.G. Boron toxicity. **Plant and Soil**, v.193, p.181–198, 1997.

NETTO, A.T.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J.G.; BRESSAN-SMITH, R.E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v.104, n.2, p.199–209, 2005.

OLIVEIRA, R.H.; DIAS MILANEZ, C.R.; MORAES-DALLAQUA, M.A.; ROSOLEM, C.A. Boron deficiency inhibits petiole and peduncle cell development and reduces Growth of Cotton. **Journal of Plant Nutrition**, v.29, n.11, p.2035–2048, 2006.

REID, R. **Update on boron toxicity and tolerance in plants**. Dordrecht: Springer, 2007. p.83-90.

SILVA, M.M.P.; VASQUES, H.M.; BRESSAN-SMITH, R.; SILVA, J.F.C. Eficiência fotoquímica de gramíneas forrageiras tropicais submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.35, n.1, p.67-74, 2006.

SNIDER, J.L.; KAWAKAMI, E.M. Efeito da temperatura no desenvolvimento do algodoeiro. In: ECHER, F.R.O. **O algodoeiro e os estresses abióticos: temperatura, luz, água e micronutrientes**. Dourados: Alice, 2006.

SOUZA FERRAZ, R.L.; MACÊDO BELTRÃO, N.E.; MELO, A.S.; MAGALHÃES, I.D.; FERNANDES, P.D.; SOCORRO ROCHA, M. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.2, p.735–748, 2014.

YAMANE, Y.; KASHINO, Y.; KOIKE, H.; SATOH, K. Increases in the fluorescence F_o level and reversible inhibition of photosystem II reaction center by high-temperature treatments in higher plants. **Photosynthesis Research**, v.52, n.1, p.57–64, 1997.