

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E SILÍCIO É VIÁVEL  
AGRONOMICAMENTE PARA PLANTA DE COUVE-FLOR**

**José Lucas Farias da Silva**

**Engenheiro Agrônomo**

**2020**

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

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E SILÍCIO É VIÁVEL  
AGRONOMICAMENTE PARA PLANTA DE COUVE-FLOR**

**José Lucas Farias da Silva**

**Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado**

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).

**2020**

S586p

Silva, José Lucas Farias da

Pulverização foliar de boro e silício é viável agronomicamente para planta de couve-flor / José Lucas Farias da Silva. -- Jaboticabal, 2020  
41 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

1. Elemento benéfico. 2. Estresse nutricional. 3. Micronutriente. 4.  
Brassica oleracea var. botrytis. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal




**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E SILÍCIO É VIÁVEL AGRONOMICAMENTE PARA PLANTA DE COUVE-FLOR

**AUTOR: JOSÉ LUCAS FARIAS DA SILVA**

**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

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. CID NAUDI SILVA CAMPOS (VIDEOCONFERÊNCIA)  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul-UFMS / Chapadão do Sul/MS

  
Prof. Dr. FÁBIO LUIZ CHECCHIO MINGOTTE  
CTA - Colégio Técnico Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 27 de julho de 2020

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

**JOSÉ LUCAS FARIAS DA SILVA** nasceu na cidade de Carpina - PE, em 30 de outubro de 1994, filho de Josenilda Maria Farias da Silva e Ginaldo Farias da Silva, mas cresceu em Lagoa do Itaenga-PE. Possui título de Engenheiro Agrônomo (2018) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Câmpus Vitória de Santo Antão. Nesta instituição, foi bolsista de Iniciação Acadêmica, de 2014 a 2015, pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), e bolsista de Iniciação Científica, de 2016 a 2018, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), sendo orientado pelos professores Dr. Sandro Augusto Bezerra, Dr. Márcio Fléquisson Alves Miranda e Dr. Renato Lemos dos Santos, realizando trabalhos na área de Física do Solo, Fertilidade do Solo e Produção de Biomassa para Energia, compondo os grupos de pesquisa Produção Vegetal e Manejo do Solo, e Fertilidade do Solo e Agroenergia. Participou de atividades de representação estudantil, sendo vice-presidente do Diretório Acadêmico de Agronomia, gestão 2017-2018, e representante discente no colegiado de Agronomia. Em março de 2019, ingressou no mestrado, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus Jaboticabal, sendo orientado pelo Prof. Dr. Renato de Mello Prado. Atualmente, compõe o Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (Genplant) e representante discente junto à congregação da FCAV/Unesp.

Quem a Deus tem, nada lhe falta:

só Deus basta.

***Santa Tereza D'Ávila***

À minha vó, Maria José da Silva Pimentel (*in memoriam*), e à minha mãe, Josenilda Maria da Silva (*in memoriam*), mulheres guerreiras, que apesar de todas as dificuldades nunca baixaram a cabeça em nenhum momento da vida.

Ao meu Avô, José Aurino Pimentel, e ao meu pai, Ginaldo Farias da Silva, homens que sempre me ensinaram a lutar pelas minhas aspirações, com dignidade, moral e honra.

**Dedico**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, Criador dos céus e da Terra, sem o qual nada sou. Por toda força, coragem, ânimo e fé, para conseguir vencer as batalhas diárias e suportar os percalços da vida.

A toda a minha família, por todo apoio nos mais diversos momentos. Aos meus pais Ginaldo Farias da Silva e Josenilda Maria Farias da Silva (*In memoriam*), por todos os sacrifícios e esforços realizados para a minha criação e educação, ao meu irmão, Igor Vinícius, pelo companheirismo e irmandade. E aos meus avós Júlio Soares (*In memoriam*), Margarida, José Aurino e, especialmente, à Maria José (*In memoriam*).

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, por quem tenho grande admiração e profundo respeito. Agradeço por toda confiança, paciência e pelos ensinamentos repassados de forma didática desde o primeiro dia de conversa. Ao senhor, meu muito obrigado.

À Univesidade Estadual Paulista/FCAV, pelo acolhimento e por proporcionar todo conhecimento que me permitiu evolução profissional.

Aos professores, Dr. Arthur Bernardes, Dr. José Carlos Barbosa, Dr. Rouverson Silva, Dr. Gener Pereira, Dr. Alan Panosso e Dr<sup>a</sup> Mara Cristina, por terem contribuído em meu crescimento na profissão.

Aos companheiros do grupo GENPLANT da Unesp, Jonas Pereira, Victor Guedes, Rafael Barreto, Dalila Lopes, Luís Felipe, Mariana Bomfim, Gelza Carliane, Kamilla Oliveira, Willian Bruno, Alexander, Diller, Antônio Santana e Juan Silva. E a Ana Carolina, da UFMS, por toda ajuda na coleta do experimento.

À Claudinha, técnica do Laboratório de Nutrição em Plantas, pela colaboração durante análises realizadas. Ao José Sidnaldo e à Ellen Nabiça, por toda ajuda na realização de análises no Laboratório de Tecnologia de Pós-Colheita.

Aos inúmeros amigos que pude conhecer na Unesp/FCAV e em Jaboticabal.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Meu muito obrigado!

**Meus sinceros agradecimentos.**



## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>iv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>2</b>
2.1 Importância do boro para as plantas.....	2
2.2 Boro via foliar.....	4
2.3 Importância do silício para as plantas.....	5
2.4 Boro e silício via foliar.....	6
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>7</b>
3.1 Tratamentos e condições de crescimento.....	7
3.3 Avaliações e análises realizadas.....	10
3.3.1 Peroxidação lipídica, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e firmeza das folhas.....	10
3.3.2 Compostos fenólicos e ácido ascórbico.....	10
3.3.3 Clorofila a, carotenoides e eficiência quântica do FSII.....	11
3.3.4 Número de folhas, área foliar e massa seca da parte aérea.....	11
3.3.5 Acúmulo de B e Si.....	11
3.4 Análise estatística.....	12
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>12</b>
4.1 Acúmulo de Si e B na parte aérea da couve-flor.....	12
4.2 Peroxidação lipídica, H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> e firmeza das folhas.....	14
4.3 Compostos fenólicos e ácido ascórbico.....	15
4.4 Clorofila a, carotenoides e eficiência quântica do FII.....	16
4.5 Número de folhas por planta, área foliar e massa seca da parte aérea.....	17
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>22</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>22</b>

## PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E SILÍCIO É VIÁVEL AGRONOMICAMENTE PARA PLANTA DE COUVE-FLOR

**RESUMO** – A aplicação via foliar de boro (B) tem sido amplamente utilizada no cultivo de brássicas, mas falta pesquisa sobre sua relação com Si. Objetivou-se verificar se os efeitos da aplicação via foliar de B, na nutrição e no crescimento da couve-flor, podem ser potencializados com a adição de silício (Si) na calda de aplicação. O experimento foi realizado em casa de vegetação, sendo os tratamentos constituídos em esquema fatorial 4 x 2, sendo quatro concentrações de B via foliar (0,0; 0,11; 0,25 e 0,42 g L<sup>-1</sup>), na ausência e presença (12 mmol L<sup>-1</sup>) de Si, dispostos em blocos casualizados, com quatro repetições. Foi utilizado o ácido bórico como fonte de B e o silicato de potássio como fonte de Si, sendo as concentrações de potássio equilibradas nos tratamentos sem Si. As plantas foram cultivadas em vasos preenchidos com areia lavada, que receberam a solução nutritiva com baixa concentração de B, e os tratamentos via foliar, que foram cultivadas por cento e cinquenta dias, totalizando nove aplicações. A aplicação via foliar de B com adição de Si na calda, em relação a sua ausência, aumenta a absorção de B. Além disso, o Si aliviou o estresse oxidativo ao diminuir a produção de malondialdeído e de peróxido de hidrogênio por aumentar a produção de compostos fenólicos e de ácido ascórbico, refletindo na firmeza dos tecidos foliares, bem como incrementou a produção de pigmentos fotossintetizantes, a eficiência quântica do fotossistema II e as variáveis de crescimento das plantas de couve-flor. A adição de Si na calda, para aplicação via foliar de B em couve-flor, é viável agronomicamente.

**Palavras-chave:** elemento benéfico, estresse nutricional, micronutriente, *Brassica oleracea* var. *botrytis*.

## BORON AND SILICON FOLIAR SPRAYING IS AGRONOMICALLY VIABLE FOR CAULIFLOWER PLANT

**ABSTRACT** – The foliar application of boron (B) has been widely used in the cultivation of brassica, but research on its relationship with silicon (Si) is lacking. The objective was to verify if the effects of B foliar spray on cauliflower nutrition and growth can be enhanced with the addition of Si in the spraying liquid. The experiment was carried out in a greenhouse, with the treatments constituted of a 4 x 2 factorial scheme, with four concentrations of B via leaf (0.0; 0.11; 0.25 and 0.42 g L<sup>-1</sup>) in the absence and presence (12 mmol L<sup>-1</sup>) of Si, arranged in randomized blocks, with four replicates. Boric acid was used as a source of B and potassium silicate as a source of Si, with potassium concentrations balanced in treatments without Si. The plants were grown in pots filled with washed sand that received the nutrient solution with low concentration of B, and the treatments via leaf, that were grown for one hundred and fifty days, totaling nine applications. The foliar spraying of B with the addition of Si in the spraying liquid, in relation to its absence, increases the absorption of B. In addition, Si relieved oxidative stress by decreasing the production of malondialdehyde and hydrogen peroxide by increasing the production of phenolic compounds and ascorbic acid, reflecting on the firmness of the leaf tissues, as well as increasing the production of photosynthetic pigments, quantum efficiency of photosystem II, and the growth variables of cauliflower plants. The addition of Si in the spray solution for foliar spraying of B is agronomically viable for cauliflower plants.

**Keywords:** beneficial element, nutritional stress, micronutrient, *Brassica oleracea* var. *botrytis*

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>Figura 1.</b> Temperatura mínima (T° Mín.) e máxima (T° Máx.) e umidade relativa do ar mínima (UR Mín. %) e máxima (UR Máx. %) no interior da casa de vegetação, durante a execução do experimento com a cultura da couve-flor.....	19
<b>Figura 2.</b> Acúmulo de silício (A) e boro (B) na parte aérea de plantas de couve-flor em relação ao aumento das concentrações de boro foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação.....	24
<b>Figura 3.</b> Folhas recém-desenvolvidas de plantas de couve-flor deficientes em boro (-B) sem (-Si) e com a aplicação via foliar de silício (+Si).....	25
<b>Figura 4.</b> Teor foliar de MDA (A), H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (B) e firmeza foliar (C) em plantas de couve-flor, em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação.....	26
<b>Figura 5.</b> Produção de compostos fenólicos (A) e de ácido ascórbico (B) em plantas de couve-flor, em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação.....	27
<b>Figura 6.</b> Produção de clorofila a (A); produção de carotenoides (B), e eficiência quântica do fotossistema II (C) em plantas de couve-flor, em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na solução de aplicação.....	28
<b>Figura 7.</b> Número de folhas (A), área foliar (B) e massa seca da parte aérea (C) das plantas de couve-flor, em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação.....	30
<b>Figura 8.</b> Plantas de couve-flor em função do aumento das concentrações de boro via foliar (0 a 0,42 g L <sup>-1</sup> ), com e sem a adição de silício na calda de aplicação, em relação a planta controle.....	31

## 1 INTRODUÇÃO

A adubação com micronutrientes, a exemplo do boro (B), é fundamental para as Brássicas, em especial para plantas de couve-flor (May et al., 2007). O B é absorvido pelas plantas na forma de ácido bórico não dissociado e tem alta solubilidade, podendo ser lixiviado no solo (Sá e Ernani, 2016).

O B atua na divisão celular e no transporte de açúcar, destacando-se sua participação na formação da parede celular (Zhou et al., 2017). Nas plantas, possui baixa mobilidade, e sua deficiência resulta na redução do crescimento vegetativo (Hu e Brown, 1994).

A deficiência do B provoca alterações fisiológicas, como redução do tamanho das folhas, paralisação do crescimento apical e restrição no crescimento radicular. Dentre as alterações bioquímicas, a deficiência de B proporciona o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) e o aumento da peroxidação lipídica e, conseqüentemente, causa a morte de células (Koshiha et al., 2009; Cakmak e Römheld, 1997).

Ao considerarmos a mobilidade do B no solo, a adubação boratada, realizada no plantio das culturas, pode não atender à demanda das plantas até o fim do ciclo. Assim, um complemento para o manejo nutricional do B, caso fosse necessário, seria a aplicação via foliar desse nutriente.

A aplicação de B via foliar tem sido uma alternativa de fornecimento do nutriente às plantas, sendo uma prática que se tem expandido na agricultura, especialmente na produção de Brássicas. Por ser uma prática recorrente nos cultivos, uma estratégia que poderia aumentar a resposta da cultura à aplicação via foliar do B, seria a adição de silício (Si) na calda.

A interação pode ocorrer, pois o Si tem atenuado estresses, como o nutricional (Deus et al., 2019; Nikolic et al., 2019; Oliveira et al., 2019), a exemplo da deficiência de B. Isso pode ocorrer porque o Si ativa sistemas enzimáticos e não enzimáticos que reagem com as EROs neutralizando-os (Kim et al., 2017).

Além disso, o fornecimento de Si, ao proporcionar dupla deposição de sílica na epiderme da folha, permite melhor arquitetura foliar, proporcionando maior eficiência fotossintética e também aumenta os pigmentos fotossintéticos e a fluorescência da clorofila (Ferraz et al., 2015; Maghsoudi et al., 2015). Soma-se a isto o fato de que a deposição do B pode ocorrer principalmente na parede das células da epiderme (Rodrigues et al., 2011), dada sua participação na formação de polissacarídeos, como a celulose e a hemicelulose, e o polifenol (Guerriero et al., 2016).

Diante do exposto, surge a hipótese de que o Si atenua os efeitos da desordem nutricional de B e potencializa a resposta da couve-flor à aplicação via foliar do micronutriente.

Portanto, objetivou-se verificar se os efeitos da aplicação via foliar de B na nutrição e no crescimento da couve-flor, podem ser incrementados com a adição de Si na calda de aplicação.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Importância do boro para as plantas**

O B é um micronutriente que desempenha importantes papéis nas plantas. Apresenta faixa estreita entre excesso e nível de deficiência no solo e na planta, sendo dependente do tipo do solo. Em solos arenosos ou com pouca matéria orgânica, o nutriente pode ser facilmente lixiviado (Padbhushan e Kumar, 2017).

O B pode ser absorvido pelas plantas em diversas formas químicas ( $H_3BO_3$ ;  $H_2BO_3^-$ ;  $B(OH)_4^-$ ), mas predomina  $H_3BO_3$  (Prado, 2020). O mecanismo de absorção pela planta é dependente da disponibilidade do B. Havendo baixa disponibilidade do nutriente, a absorção ocorre de forma ativa, havendo dependência de transportadores específicos, caso contrário, na abundância do nutriente, ela ocorre por difusão passiva (Tanaka e Fujiwara, 2008).

Do B presente nas plantas, até 90% são encontrados na parede celular, onde ele atua em sua síntese e na estabilidade, pois forma ésteres com grupos cis-diol,

fornecendo rigidez, força e forma à célula, e o desenvolvimento de novas folhas e de gemas apicais apresenta alta demanda por B (Loomis e Durst, 1992; Match et al., 1996). Com isso, a deficiência do B expressa-se nessas regiões, devido sua baixa mobilidade floemática, promovendo a diminuição da plasticidade da parede celular, o que gera falha no aumento de células recém-divididas, além de proporcionar alta permeabilidade a estas membranas e a perda de sua integridade funcional (İşkil e Surgun-Acar, 2018).

Dentre os papéis biológicos desempenhados pelo B, destaca-se sua importância no metabolismo de fenóis, de carboidratos, proteínas, atuação na síntese de uracil e do ácido indolacético (AIA), porém a base molecular desses papéis é praticamente desconhecida (Goldbach et al., 2001; Tanaka e Fujiwara, 2008).

No estágio vegetativo das plantas, a deficiência de B pode causar alterações bioquímicas, como dano oxidativo, e perda da rigidez dos tecidos, diminuindo o desenvolvimento das culturas (Koshiba et al., 2009). Este dano oxidativo é resultado do aumento de ERO, havendo maior produção e acúmulo de malondialdeído (MDA) e peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), conferindo menor crescimento (Hajiboland e Farhanghi 2010), pois é danificado o aparelho fotossintético das plantas (Tripathy e Oelmüller, 2012), diminuindo a fotossíntese (Li et al., 2017).

A eficiência fotossintética é influenciada pelo B, pois sua deficiência reduz a transferência de energia do fotossistema II para o fotossistema I. Além disso, em plantas deficientes em B, a acumulação de carboidratos nas folhas e o comprometimento da fotossíntese sob condições de alta luminosidade podem levar à diminuição na utilização de fotorredutores e da energia luminosa na assimilação de  $CO_2$  (Cakmak e Römheld, 1997).

Os solos apresentam baixo teor de B devido à lixiviação ou ao baixo teor de matéria orgânica (Ahmad et al., 2012), provocando deficiência do nutriente nas plantas e causando danos biológicos nas plantas. Para atender à demanda de B nas plantas, tem-se a opção da adubação foliar, que é amplamente utilizada nos cultivos.

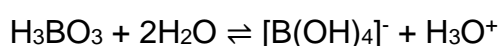
Dentre os estudos de deficiência nutricional de B, há relatos de plantas sensíveis aos danos causados pela deficiência de B, como a couve-flor (Alves et al., 2020), indicando que a cultura é responsiva a aplicações foliares do micronutriente.

## 2.2 Boro via foliar

O fornecimento do B às plantas é realizado via sistema radicular a partir da aplicação no solo, podendo ser complementado com aplicação via foliar, sendo realizado em momentos específicos do desenvolvimento das culturas. A aplicação do micronutriente no solo pode aumentar sua perda por lixiviação, especialmente em solos com baixo teor de argila e de matéria orgânica.

A aplicação via foliar de nutrientes requer condições mínimas necessárias para ser realizada, pois fatores podem interferir na absorção do nutriente pelas folhas, como: a temperatura e a umidade relativa do ar no momento da aplicação (Prado, 2020).

Quanto às fontes de B, temos o ácido bórico e o bórax, que apresentam 17,5% e 11% de B, respectivamente. Quanto ao ácido bórico, sua dissociação é dependente do valor pH, em que, em valores acima de 9,24 predomina o ânion  $[B(OH)_4]^-$ , enquanto em valor pH abaixo de 9,24 há predomínio das espécies não iônicas (Choi e Chen, 1979):



Quanto às recomendações de adubação foliar na literatura, há bastante variações. Para o Estado de São Paulo, Trani e Raij (1997) recomendam aos produtores a realização de três aplicações foliares de  $1 \text{ g L}^{-1}$  de ácido bórico em cultivos de Brássicas.

Há relatos na literatura de estudos dos efeitos da aplicação do B via foliar em couve-flor. Kotur (1998), ao realizar experimento em um Argissolo Vermelho, verificou que, ao realizar três pulverizações com início aos 10 dias após o transplante (DAT), em intervalo de 15 dias, da concentração de  $1,25 \text{ g L}^{-1}$  de ácido bórico, correspondendo a  $210 \text{ mg L}^{-1}$  de B, ocorreu maior produção de inflorescência ( $23,46 \text{ t ha}^{-1}$ ), tendo aumento de 76% em relação ao controle.



Chaudhari et al. (2017), ao realizarem duas aplicações foliares de boro aos 45 e 60 DAT em couve-flor cultivado em campo, verificaram que a aplicação de 340 mg L<sup>-1</sup> de B, que corresponde a 0,2% de ácido bórico, proporcionou incremento de 27% na altura da planta em relação ao tratamento-controle, permitindo maior produção.

A aplicação via foliar do B também apresentou respostas em planta de couve-flor no estudo realizado por Alves et al. (2020). Os autores cultivaram as plantas em vasos contendo areia lavada, havendo fornecimento de solução nutritiva, e verificaram que o fornecimento da concentração de 0,34 g L<sup>-1</sup> B foliar, aos 20 dias após o transplante, proporcionou maior área foliar e produção de massa seca.

Observa-se que os estudos que verificaram a resposta da aplicação via foliar do B em plantas de couve-flor são restritos, havendo necessidade de ampliar as pesquisas. Com isso, uma estratégia para aumentar a resposta da cultura seria a adição de Si na solução de aplicação do B, mas a viabilidade técnica desta mistura e seus efeitos biológicos são desconhecidos.

### **2.3 Importância do silício para as plantas**

O Si é considerado um elemento onipresente na natureza. Na absorção deste elemento pelas plantas, há a formação de fitólitos ou corpos de sílica que preenchem as paredes celulares (Prychid et al., 2003), porém é discutido sua associação com componentes da parede celular, como os polissacarídeos, ligninas e proteínas.

O Si atenua diferentes estresses por ativar sistemas enzimáticos e não enzimáticos que neutralizam as EROs (Kim et al., 2017). O metabolismo das plantas gera EROs como uma primeira resposta à maioria dos estresses abióticos. Esta resposta é conhecida por causar danos severos à estrutura celular e a organelas e por alterar a função celular normal. Assim, o elemento benéfico ativa sistemas antioxidativos a partir do aumento de compostos fenólicos (Farhangi-abriz e Torabian, 2018) e ácido ascórbico (Souza et al., 2018), e aumenta a atividade das enzimas superóxido dismutase, peroxidase, catalase e glutatona redutase,

diminuindo a peroxidação lipídica em plantas sob estresse (Liang, 1999; Liang et al., 2003).

O Si, ao aliviar danos oxidativos, pode aumentar pigmentos fotossintetizantes e ter reflexos na qualidade da fotossíntese (Verma et al., 2019), pois a deposição do Si ocorre abaixo da cutícula da epiderme; com isso, as folhas ficam mais eretas, permitindo maior incidência solar, que irá permitir aumento da fotossíntese. Além de preservar os pigmentos fotossintéticos, que, em caso de estresse nutricional, evitam a diminuição da fotossíntese (Ferraz et al., 2015; Maghsoudi et al., 2015), o elemento benéfico também diminui a permeabilidade da membrana plasmática, preservando a estrutura dos cloroplastos (Al-Aghabary et al., 2004).

Assim, fica evidenciado que os estudos indicam o papel benéfico do Si em plantas de couve-flor, mas sem avaliar seus efeitos interativos com o B. Além disso, a utilização do Si, especialmente na forma de silicato de potássio, tem-se mostrado uma fonte promissora por contribuir beneficentemente com as plantas.

#### **2.4 Boro e silício via foliar**

Ao considerarmos as formas de atuações do B e do Si nas plantas, pode-se afirmar que pode haver relação favorável entre os elementos, devido à semelhança de seus benefícios na parede celular e em outros efeitos.

O B constitui complexos de ésteres cis-borato, sendo responsável pela formação dos componentes da parede celular (pectina, hemicelulose e precursores da lignina) (Hu e Brown, 1994), enquanto o Si incrementa composto lignina-carboidratos na parede celular das células epidérmicas, dado maior lignificação, formando ligações cruzadas com a celulose (Inanaga et al., 1995).

Fica evidente a importância destes elementos na integridade da parede celular. Este fato é importante, especialmente em espécies com alta exigência de B, como as brássicas. Isso ocorre porque essas espécies têm maior conteúdo do micronutriente complexado na parede celular (Matoh et al., 1996).

Soma-se a isto o fato de que o Si, ao melhorar o sistema de defesa antioxidante da planta, evita a formação de espécies reativas de oxigênio que pode

degradar a clorofila (Kim et al., 2017). E o B também pode diminuir a degradação deste pigmento, pois ele inibe a atividade da clorofilase (Sabater e Rodriguez, 1978).

E ainda existe relação do Si e do ácido bórico na calda de aplicação, pois o fornecimento dessa fonte de B diminui a polimerização do Si na calda (Queen, 1977) e, por conseguinte, favorece a absorção do Si. Portanto, ficou evidente a pertinência da associação destes dois elementos e espera-se que haja uma interação benéfica para favorecer o desenvolvimento da couve-flor.

Ao estudar os efeitos do B e do Si via foliar na cultura do trigo, Ahmed et al. (2008) cultivaram as plantas em vasos preenchidos com solo e verificaram que as concentrações de 466 mg L<sup>-1</sup> de Si e 25 mg L<sup>-1</sup> de B, fornecidos em caldas diferentes, aos 40 e 70 dias após o plantio, promoveram incremento da altura das plantas e da área foliar. Na cultura do arroz, Ahmad et al. (2012) constataram em campo que o fornecimento da combinação de B e Si na calda de aplicação, na concentração de 3 450 mg L<sup>-1</sup> de Si com 800 mg L<sup>-1</sup> de B, proporcionou maior altura das plantas e maior massa de mil grãos, além de aumentar a produtividade, mas não sendo informados a época e o número de aplicações. No entanto, os autores dos dois trabalhos não apresentaram dados referentes ao acúmulo do Si e do B nas plantas ou as alterações do estado nutricional destas espécies em função da aplicação dos tratamentos, prejudicando a fundamentação científica destes resultados.

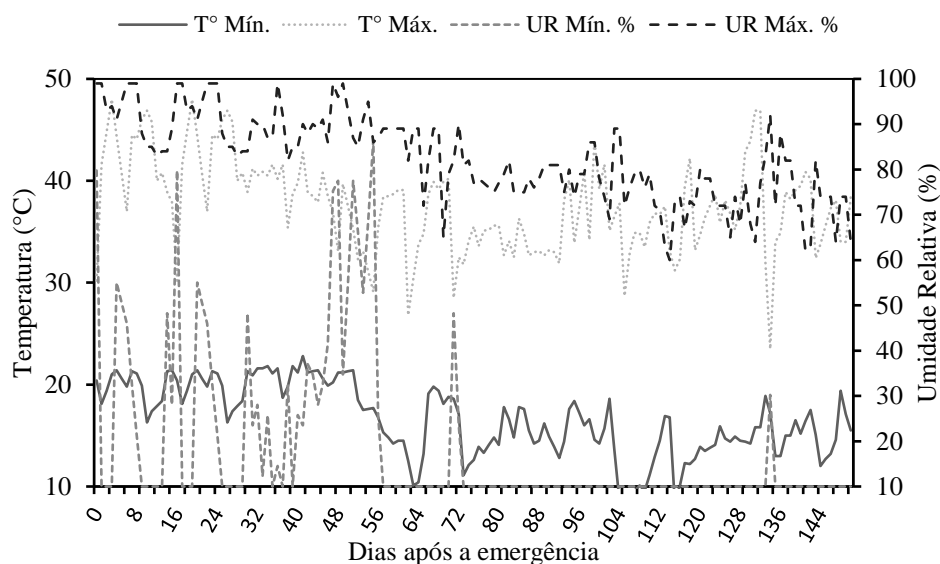
Os estudos sobre a interação de B e Si via foliar nas culturas são ausentes nas Brássicas. Portanto, é importante avançar nos estudos sobre a interação B e Si em plantas responsivas como a couve-flor, para fortalecer e otimizar a prática da adubação foliar boratada nesta cultura.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Tratamentos e condições de crescimento**

Foi desenvolvido experimento entre março e agosto de 2019, com couve-flor cultivar Quatro Estações, em sistema de cultivo sem solo, em casa de vegetação, da Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, Brasil. Durante o período experimental, a temperatura e a umidade relativa do ar foram registradas (Figura 1). Observa-se

que a média da temperatura mínima e máxima foi de 16 e 37°C, respectivamente, estando a temperatura máxima acima do valor indicado como adequada para o cultivo da couve-flor (20 a 25°C) (May et al., 2007).



**Figura 1.** Temperatura mínima ( $T^{\circ}$  Mín.) e máxima ( $T^{\circ}$  Máx.) e umidade relativa do ar mínima (UR Mín. %) e máxima (UR Máx. %) no interior da casa de vegetação, durante a execução do experimento com a cultura da couve-flor.

O experimento foi realizado em esquema fatorial 4 x 2, havendo quatro concentrações de B foliar (0,0; 0,11; 0,25 e 0,42 g L<sup>-1</sup>) na ausência e na presença (12 mmol L<sup>-1</sup>) de Si, com quatro repetições, dispostos em blocos casualizados.

As concentrações de B utilizadas foram determinadas de acordo com a recomendação de Trani e Raji (1997) para a couve-flor (0,17 g L<sup>-1</sup> de B), sendo utilizados percentuais do valor indicado em 0,0; 75,0; 150,0 e 250%. Com a determinação das concentrações do B a serem utilizadas, foram realizados testes de mistura com o B e o Si, e verificou-se, visualmente, polimerização na maior concentração de B (0,42 g L<sup>-1</sup>), com a concentração de Si superior a 12 mmol L<sup>-1</sup>, a partir de duas horas após a realização da mistura dos elementos.

Foram utilizados o ácido bórico (17,5% de B) como fonte de B foliar e o silicato de potássio (115,2 g L<sup>-1</sup> de Si e 113,85 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) estabilizado com sorbitol como fonte de Si foliar, sendo as concentrações de potássio equilibradas

nas parcelas sem Si com KCl. A água utilizada para o preparo da calda de aplicação era destilada e duplamente deionizada.

A unidade experimental era constituída de um vaso de polipropileno com capacidade para 5 dm<sup>3</sup> (diâmetro superior: 23 cm; diâmetro inferior: 16 cm, altura: 16,5 cm), preenchido com 4,5 dm<sup>3</sup> de areia previamente lavada com água, solução de HCl (1%) e água deionizada.

Foram semeadas cinco sementes de couve-flor diretamente nos vasos e foi realizado desbaste para manter uma planta por vaso. Após a emergência, as plântulas passaram a receber solução nutritiva com a força iônica de 10%, sendo aumentada a cada quinze dias para 30%; 50%; 70% e por fim 90%, a qual foi mantida até o final do período experimental.

As plantas foram nutridas de acordo com a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) modificada, com substituição na fonte de Fe de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA, e o valor pH da solução foi ajustado para  $5,7 \pm 0,2$ . A concentração de B recomendada na solução nutritiva era de  $46,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ ; porém, para induzir nas plantas deficiência moderada do micronutriente, foram utilizados 10,0% do valor recomendado ( $4,6 \mu\text{mol L}^{-1}$ ).

O substrato foi lavado a cada quinze dias, com a finalidade de eliminar o excesso de sal. Para isso, 2 000 mL de água deionizada foram adicionados a cada vaso, induzindo a drenagem de 750 mL de solução nutritiva, a qual foi descartada. Após duas horas, nova solução nutritiva foi fornecida às plantas.

Para a realização da aplicação dos tratamentos, cada planta era retirada da casa de vegetação, para que não houvesse contaminação. Durante a condução do experimento, foram realizadas nove aplicações foliares, com o uso de pulverizador manual, sendo as aplicações iniciadas quando as plantas apresentaram sete folhas definitivas, ou seja, totalmente expandidas, aos 57 DAE, havendo intervalo de dez dias entre as aplicações. Para realizar as aplicações foliares, o substrato de cada vaso foi coberto com algodão e papel absorvente para evitar contaminação via sistema radicular.

As aplicações dos tratamentos ocorreram pela manhã (5h30min – 6h30min), e com o uso do termo-higrômetro observou-se que a umidade relativa do ar (80-90%) e a temperatura (15-18°C) no momento das aplicações se encontravam em condições consideradas adequadas para a realização da aplicação foliar de nutrientes (Prado, 2020).

### **3.3 Avaliações e análises realizadas**

As avaliações e as análises descritas a seguir foram realizadas entre o período de 145 e 150 dias após a emergência das plântulas, 90 dias após o início da aplicação dos tratamentos. Nas análises 3.3.1; 3.3.2 e 3.3.3, foram utilizadas folhas da região do terço médio da planta.

#### **3.3.1 Peroxidação lipídica, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e firmeza das folhas**

A determinação da peroxidação lipídica deu-se pela estimativa do conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), conforme descrito por Heath e Packer (1968), sendo a concentração de malondialdeído (MDA) determinada em um espectrofotômetro com comprimento de onda de 535 e 600 nm; e os resultados, expressos em nMol g<sup>-1</sup> de matéria fresca. O conteúdo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi estimado de acordo com a metodologia proposta por Alexieva et al. (2002), sendo as concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> determinada por espectrofotômetro, com comprimento de onda de 390 nm. Os resultados foram expressos em μMol g<sup>-1</sup> de matéria fresca. A firmeza do tecido foliar foi determinada com a utilização de penetrômetro (Impact, modelo IP-90DI, Brasil) com escala de leitura de até 200 N, utilizando ponteira de 6 mm. As leituras foram realizadas em três pontos da região central das folhas. Logo, os resultados foram expressos em Newton (N).

#### **3.3.2 Compostos fenólicos e ácido ascórbico**

O teor foliar dos compostos fenólicos totais foi determinado através de reação colorimétrica e leitura em espectrofotômetro, de acordo com Singleton e Rossi (1965) e o conteúdo fenólico foi determinado em gramas equivalentes de ácido gálico (EAG) por grama de extrato. A determinação da concentração do ácido ascórbico foi realizada através de titulação, pelo método descrito por Strohecker e

Henning (1967); e os resultados, expressos em mg de ácido ascórbico por 100 g de peso fresco (mg/100 g).

### **3.3.3 Clorofila a, carotenoides e eficiência quântica do FSII**

A determinação do teor de clorofila a e de carotenoides foi realizada pelo método proposto por Lichtenthaler (1987), sendo coletados no terço médio do limbo foliar dois discos de 6 mg. As leituras foram realizadas em um espectrofotômetro a 663 nm (clorofila a) e 470 nm (carotenoides); e o conteúdo, definido com base na matéria fresca.

A eficiência quântica do FII foliar foi mensurada com o uso do fluorômetro (Opti-Sciences® - Os30p+). As medições deram-se entre 7h e 8h30 da manhã, e para adaptação da folha à luz, em um período de 30 minutos com o uso de pinças, a região amostral foi submetida ao escuro antes da excitação do pulso de luz vermelha de 1 s, sendo determinadas: F<sub>0</sub> (fluorescência inicial), F<sub>m</sub> (fluorescência máxima), F<sub>v</sub> (variação na fluorescência calculada a partir de F<sub>0</sub> e F<sub>m</sub>), e, assim, a obtenção da F<sub>v</sub> / F<sub>m</sub> (eficiência quântica do FSII) (razão de fluorescência variável e fluorescência máxima).

### **3.3.4 Número de folhas, área foliar e massa seca da parte aérea**

O número de folhas da couve-flor foi obtido a partir de sua contagem. Para determinar a área foliar das plantas, foi utilizado um aparelho integrador de área foliar (Licor 3100). A parte aérea das plantas foi lavada em água corrente com uma solução detergente neutro a 0,1%, solução de HCl a 0,3% e água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar (65 ± 5 ° C) até peso constante, sendo obtida a matéria seca do vegetal.

### **3.3.5 Acúmulo de B e Si**

Nas amostras da parte aérea da planta, foi determinado o teor de B total a partir da digestão por incineração e leitura em espectrofotômetro, conforme indicação de Bataglia et al. (1983). O teor de Si foi determinado através de digestão alcalina com H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e NaOH, seguido por leitura em espectrofotômetro colorimétrico, de acordo com metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004). Com base no teor

de B e de Si, e o valor da matéria seca, calculou-se o acúmulo de B e Si na parte aérea das plantas.

### **3.4 Análise estatística**

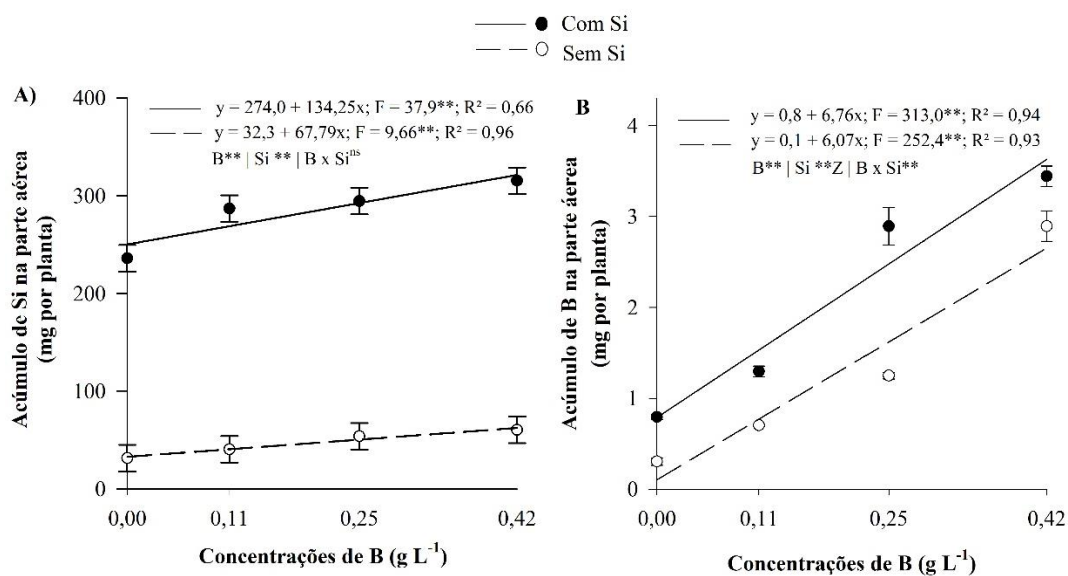
Os dados foram submetidos à análise de variância (Teste F) e, quando significativo, ao teste de comparação de médias (Tukey), a 5% de probabilidade, e realizou-se estudo de regressão polinomial para avaliar os efeitos das concentrações de B, sendo escolhido o modelo que foi significativo e com maior coeficiente de determinação, a partir do uso do AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior, 2016).

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Acúmulo de Si e B na parte aérea da couve-flor**

A aplicação foliar de B aumentou com ajuste linear o acúmulo de Si e de B na parte aérea das plantas de couve-flor, com destaque para a adição de Si na calda em relação a sua ausência (Figuras 2a,b). Assim, pelo coeficiente angular da reta, observa-se que o fornecimento de Si na calda, em relação a sua ausência, proporcionou incremento médio de 11,3% no acúmulo de B. Observou-se sintoma visual de deficiência de B em folhas recém-desenvolvidas, havendo irregularidade na superfície foliar e deformação no ápice da folha, mas sendo atenuada pela adição de Si na calda de aplicação (Figura 3).





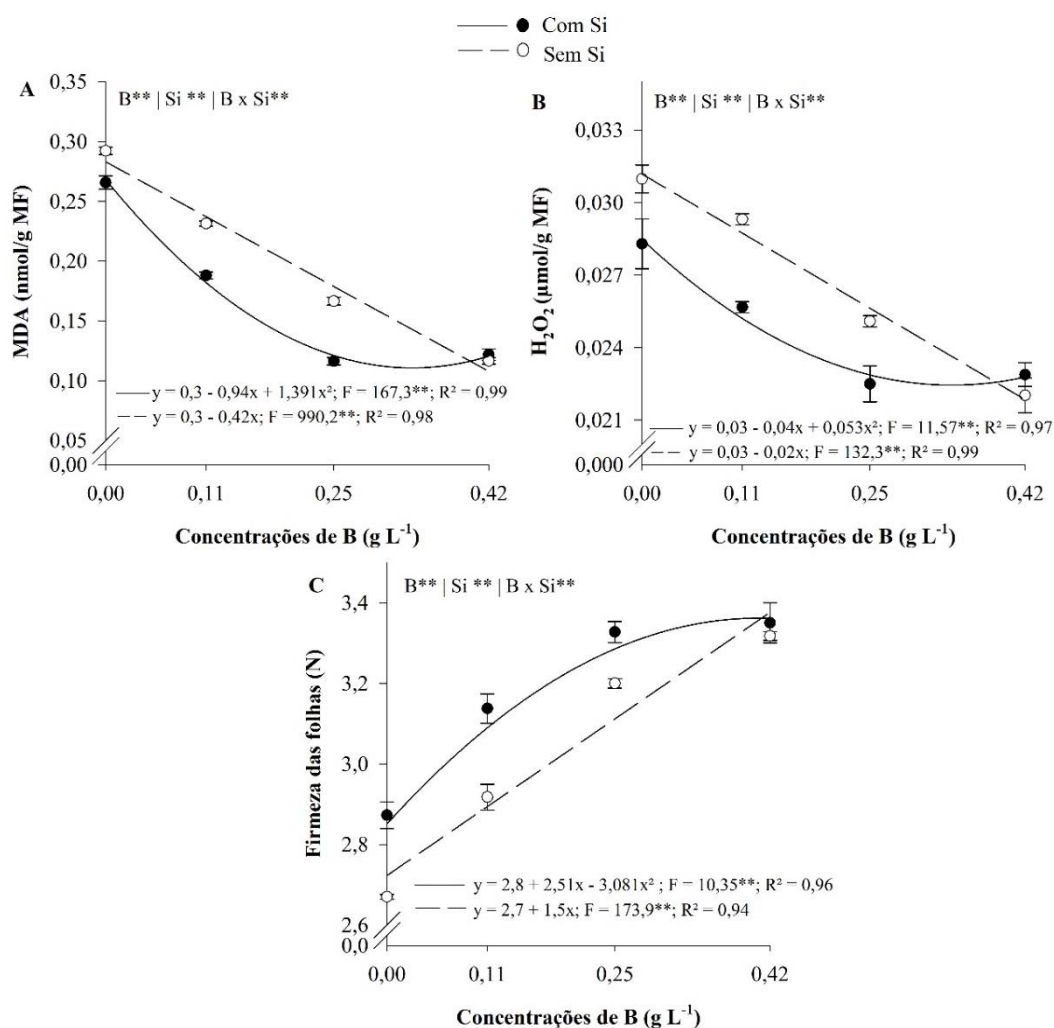
**Figura 2.** Acúmulo de silício (A) e boro (B) na parte aérea de plantas de couve-flor em relação ao aumento das concentrações de boro foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação. \*\*: significativo a 1% de probabilidade; ns: não significativo pelo teste F. As barras de erro representam os erros-padrão das médias,  $n = 4$ .



**Figura 3.** Folhas recém-desenvolvidas de plantas de couve-flor deficientes em boro (-B) sem (-Si) e com a aplicação via foliar de silício (+Si).

## 4.2 Peroxidação lipídica, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e firmeza das folhas

Os efeitos da aplicação via foliar de B diminuíram os teores de MDA (Figura 4a), de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Figura 4b) e aumentaram a firmeza das folhas (Figura 4c) de plantas de couve-flor e foram dependentes da adição do Si na calda. A aplicação via foliar de B nas concentrações de 0,0; 0,11 e 0,25 g L<sup>-1</sup>, com a adição de Si na calda, em relação a sua ausência, diminuiu os teores de MDA em 10,0%; 23,0% e 0,4%; e os teores de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, em 10,0%; 14,0% e 11,0%, respectivamente.



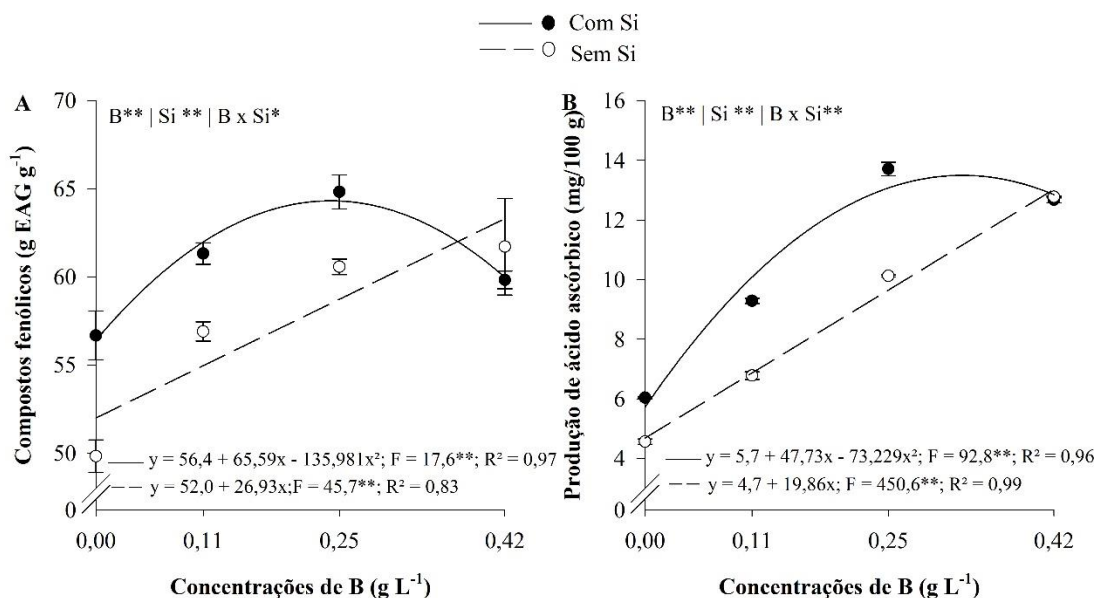
**Figura 4.** Teor foliar de MDA (A), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (B) e firmeza foliar (C) em plantas de couve-flor em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação. \*\*: significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. As barras de erro representam os erros-padrão das médias, n = 4.

O índice de firmeza das folhas teve ajuste quadrático, com a adição de Si, com ponto de máxima firmeza (3,36 N) na concentração de 0,40 g L<sup>-1</sup> de B,

apresentando incremento de 7,5%; 4,0% e 4,0% nas concentrações de 0,0; 0,11 e 0,25 g L<sup>-1</sup> de B, respectivamente, quando ocorreu a adição de Si na calda, em relação a sua ausência.

### 4.3 Compostos fenólicos e ácido ascórbico

Os efeitos da aplicação via foliar de B nos teores de compostos fenólicos (Figura 5a) e de ácido ascórbico (Figura 5b), em plantas de couve-flor, dependeram da adição de Si na calda. A aplicação via foliar de B com adição de Si na calda, em relação a sua ausência, proporcionou pontos de maior produção de compostos fenólicos (64,31 g EAG g<sup>-1</sup>) e de ácido ascórbico (13,49 mg/100 g), nas concentrações de 0,24 e 0,32 g L<sup>-1</sup> de B, respectivamente.

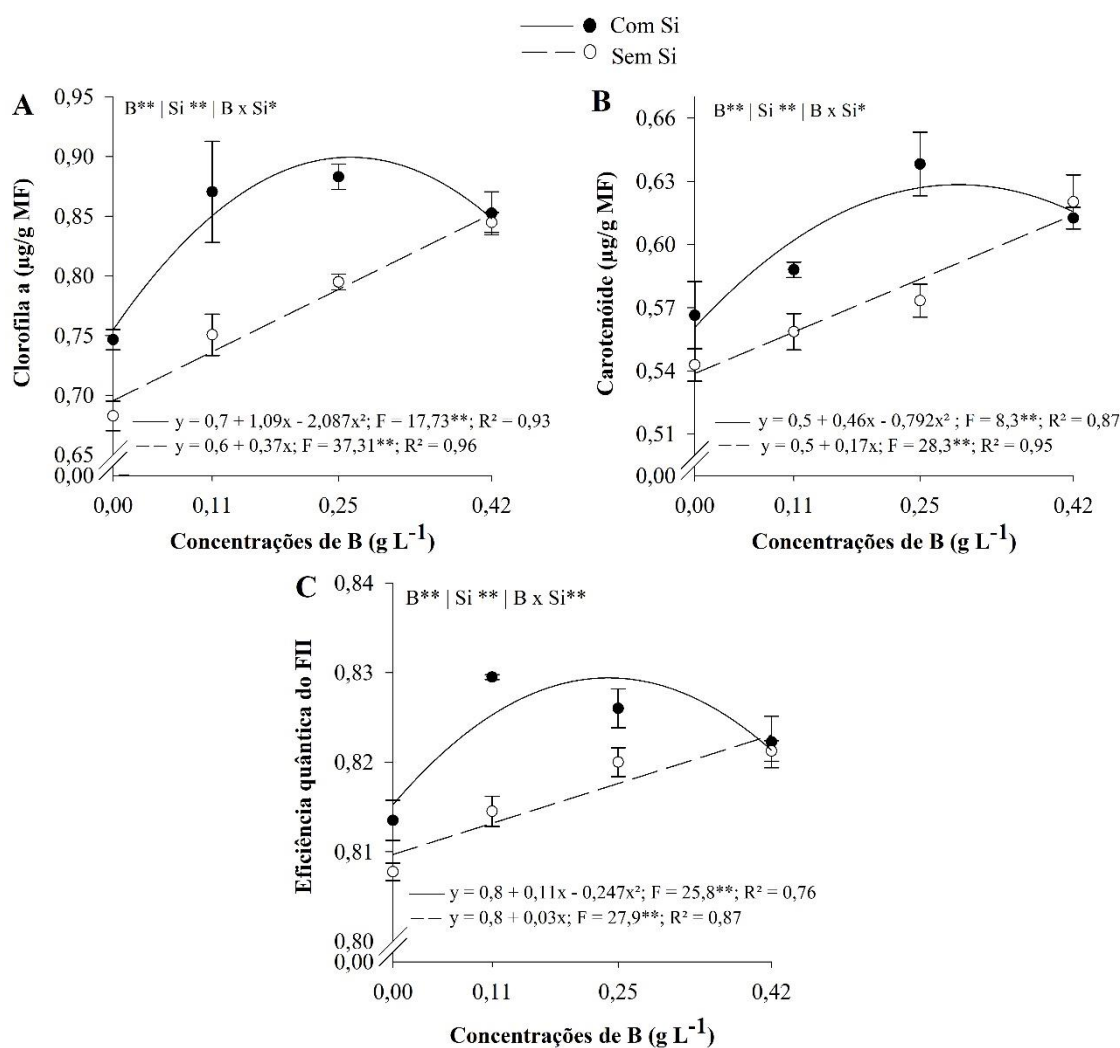


**Figura 5.** Produção de compostos fenólicos (A) e de ácido ascórbico (B) em plantas de couve-flor, em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação. \*\*: significativo a 1% de probabilidade; \*: significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. As barras de erro representam os erros-padrão das médias, n = 4.

Houve incremento na produção de compostos fenólicos de 14,0%; 7,0% e 7,0%, e do ácido ascórbico de 32,0%; 37,0% e 35,0%, com aplicação via foliar de B nas concentrações de 0,0; 0,11 e 0,25 g L<sup>-1</sup>, respectivamente, com a adição de Si na calda em relação a sua ausência.

#### 4.4 Clorofila a, carotenoides e eficiência quântica do FII

Os efeitos da aplicação via foliar de B na produção de clorofila a (Figura 6a), de carotenoides (Figura 6b) e EQFII (Figura 6c), em plantas de couve-flor, dependeram da adição de Si na calda.



**Figura 6.** Produção de clorofila a (A); produção de carotenoides (B), e eficiência quântica do fotossistema II (C) em plantas de couve-flor, em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na solução de aplicação. \*\*: significativo a 1% de probabilidade; \*: significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. As barras de erro representam os erros-padrão das médias, n = 4.

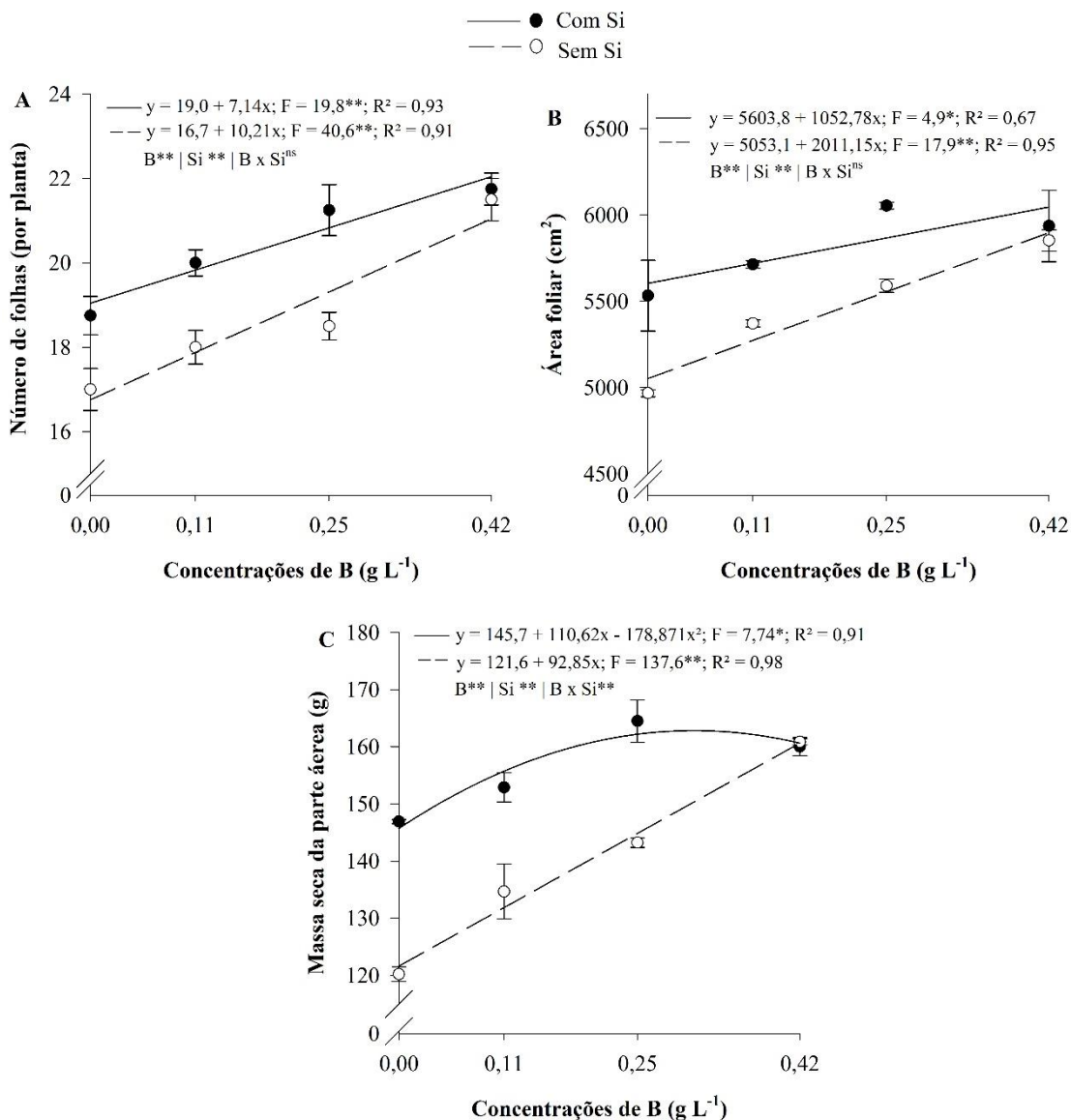
A aplicação via foliar de B com a adição de Si na calda, em relação a sua ausência, proporcionou pontos de maior produção de clorofila a (0,89 µg/g MF), de

carotenoides (0,62  $\mu\text{g/g}$  MF) e EQFII (0,82) nas concentrações de 0,26; 0,29 e 0,23  $\text{g L}^{-1}$  de B, respectivamente. Com a adição de Si na calda em relação a sua ausência, houve incremento na produção de clorofila a em 9,0%; 15,0% e 11,0%, de carotenoides de 4,0%; 5,0% e 11,0%, e na EQFII de 7,0%; 2,0% e 1,0% com pulverizações foliar de B, nas concentrações de 0,0; 0,11 e 0,25  $\text{g L}^{-1}$  de B, respectivamente.

#### **4.5 Número de folhas por planta, área foliar e massa seca da parte aérea**

Os efeitos da aplicação via foliar de B no número de folhas por planta (Figura 7a) e na área foliar (Figura 7b) não dependeram da adição de Si na calda de aplicação; no entanto, com a adição de Si em relação a sua ausência, houve incremento no número de folhas em 10,0%; 11,0% e 15,0%; e na área foliar, de 11,0%; 6,0% e 8,0% com pulverizações foliares de B nas concentrações de 0,0; 0,11 e 0,25  $\text{g L}^{-1}$  de B, respectivamente.

Na produção de massa seca (Figura 7c), os efeitos da aplicação via foliar de B dependem da adição de Si na calda. A aplicação via foliar de B, com adição de Si na calda, em relação a sua ausência, proporcionou ponto de maior produção de massa seca (162 g) na concentração de 0,30  $\text{g L}^{-1}$  B. Houve incremento na produção de massa seca de 22,0%; 13,0% e 15,0% com aplicação via foliar de B, nas concentrações de 0,0; 0,11 e 0,25  $\text{g L}^{-1}$ , respectivamente, com a adição de Si na calda em relação a sua ausência. Observou-se diferença visual no desenvolvimento de plantas de couve-flor em relação aos tratamentos aplicados (Figura 8).



**Figura 7.** Número de folhas (A), área foliar (B) e massa seca da parte aérea (C) das plantas de couve-flor, em relação ao aumento das concentrações de boro via foliar, com e sem a adição de silício na calda de aplicação. \*\*: significativo a 1% de probabilidade; ns: não significativo pelo teste F. As barras de erro representam os erros-padrão das médias,  $n = 4$ .



**Figura 8.** Plantas de couve-flor em função do aumento das concentrações de boro (B) via foliar (0 a 0,42 g L<sup>-1</sup>), com e sem a adição de silício (Si) na calda de aplicação, em relação à planta-controle.

## 5 DISCUSSÃO

Ficou claro que é possível aumentar a absorção de Si pelas folhas da couve-flor com o aumento da concentração de B na calda (Figura 2a). Esta constatação inédita deve aumentar a eficiência da aplicação via foliar com Si, com a indicação da inclusão do elemento na calda do ácido bórico. A maior absorção de Si na presença do boro pode estar associada ao fato de que a fonte utilizada, o ácido bórico, pode aumentar a estabilidade do Si em formas monoméricas ao diminuir as taxas de polimerização do elemento benéfico (Queen, 1977). E tendo maior quantidade de espécies monoméricas de Si com baixa taxa de polimerização, há maior absorção do elemento, dado ao fato de que essas espécies (ácido monossilícico) são as formas absorvidas pelos vegetais (Ma e Takahashi 2002).

Os resultados evidenciaram que os efeitos da aplicação via foliar de B podem ser potencializados, aumentando-se a absorção do micronutriente com adição de Si na calda. O silicato de potássio utilizado possui sorbitol, que pode ter favorecido a absorção do B, pois é possível diminuir a velocidade de evaporação da solução na superfície da folha por diminuir o ponto de deliquescência (Will et al., 2011). Este efeito benéfico do Si na calda, junto com B, é inédito, não havendo relatos. Portanto, surge oportunidade para ampliar o uso destes elementos na agricultura.

Observou-se que a aplicação via foliar de B sem adição de Si na calda, em relação a sua presença, ao proporcionar menor acúmulo do micronutriente nas folhas, induziu ao estresse oxidativo, dados aos maiores teores de MDA (Figura 4a) e  $H_2O_2$  (Figura 4b) nos tecidos foliares. É conhecido que teores insuficientes de B nos tecidos das plantas aumenta a produção de EROs que promovem a degradação das membranas das células pela oxidação, permitindo o efluxo do citossol para o espaço livre aparente (Koshiba et al., 2009), levando à maior produção de MDA e  $H_2O_2$  (Hajiboland e Farhanghi 2010).

Verificaram-se efeitos benéficos da presença de Si com a aplicação via foliar de B, pois diminuíram os teores de MDA e de  $H_2O_2$ , possivelmente pelo maior acúmulo do micronutriente no tecido vegetal. Soma-se a isto o fato de que o Si, ao ser depositado na parede celular, confere aumento na estabilidade e maior



resistência à membrana celular (Zhu et al., 2004), e diminui o dano oxidativo, explicado pela ação antioxidante deste elemento benéfico (Gunes et al., 2007).

Essa ação benéfica do Si na diminuição do dano oxidativo foi comprovada na presente pesquisa, devido ao aumento dos compostos antioxidantes, como o teor de compostos fenólicos (Figura 5a) e de ácido ascórbico (Figura 5b). Estes efeitos do Si via aplicação foliar, mas sem o fornecimento de B foram relatados por Farhangi-Abriz e Torabian (2018) em plantas de soja, os quais verificaram aumento na produção de compostos fenólicos, e por Souza et al. (2018) em plantas de acelga e couve, os quais observaram maior teor de ácido ascórbico.

Observou-se que a aplicação via foliar de B com a adição de Si na calda, em relação a sua ausência, aumentou a firmeza das folhas (Figura 4c). O efeito do B no aumento da firmeza do tecido vegetal é conhecido por atuar na síntese da parede celular e por estar associado a substâncias pécticas (Prado, 2020). No entanto, o acréscimo desta firmeza com adição de Si na calda de aplicação do B é uma novidade, pois os estudos são restritos. Fica evidenciado efeito sinérgico pelo fato de os dois elementos atuarem na estrutura dos tecidos e, conseqüentemente, aumentarem a firmeza do tecido vegetal. O Si aumenta a rigidez das células pelo aumento do conteúdo de lignina (Kim et al., 2002), aumentando a ligação dos componentes da parede celular, por atuar na formação de ligações cruzadas entre lignina e carboidrato (Inanaga et al., 1995).

Constatou-se que, ao realizar a aplicação via foliar de B sem a adição do Si na calda, em relação a sua presença, houve menor produção de pigmentos fotossintéticos. O baixo acúmulo do B nas folhas é uma condição favorável para a formação da clorofilase, enzima proteolítica que degrada a clorofila (Sabater e Rodriguez, 1978), devido ao estresse nutricional (Koshiba et al., 2009). Com a adição do Si na calda de aplicação, em relação a sua ausência, houve aumento dos pigmentos fotossintéticos (Figura 6a;b), possivelmente devido à função protetora do elemento na manutenção do teor de clorofila nas folhas (Adatia e Besford, 1986; Verma et al., 2019).

Verificou-se que a aplicação via foliar de B, sem a adição de Si na calda, em relação a sua presença, diminuiu a qualidade fotossintética das plantas (Figura 6c).

A redução na EQFII resulta na inativação dos centros de reação do fotossistema II (PSII) (Kooten e Snel 1990), ou seja, há redução na fotossíntese, afetando o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Observou-se que a aplicação via foliar do B com a adição de Si na calda, em relação a sua ausência, ao diminuir os efeitos nocivos do desequilíbrio nutricional de B, aumentou a fotossíntese das plantas de couve-flor, possivelmente devido ao Si atuar no aparelho fotossintético das plantas (Berger et al., 2007).

E ao diminuir o dano oxidativo e ao contribuir com a EQFSII, a adição de Si na calda, para aplicação via foliar de B, proporciona maior área foliar e massa seca das plantas (Figura 7). Observou-se que a massa seca produzida na concentração de  $0,11 \text{ g L}^{-1}$  de B (155,7 g), com a adição de Si, correspondeu a 95% da maior massa seca obtida, e a mesma massa seca foi atingida, mas com concentração alta do micronutriente, de  $0,37 \text{ g L}^{-1}$  de B, quando não adicionou Si na calda. Portanto, é possível diminuir a necessidade de B na aplicação via foliar em 30,0% e manter o mesmo crescimento da planta.

## 6 CONCLUSÕES

A aplicação via foliar de B, com adição de Si na calda, é viável agronomicamente para a couve-flor, por incrementar o acúmulo do micronutriente e por diminuir o dano oxidativo pelo aumento de compostos antioxidantes favorecendo os pigmentos fotossintéticos e a qualidade da fotossíntese, refletindo em maior crescimento da planta.

Pelos resultados, propõe-se a aplicação foliar na concentração de  $0,11 \text{ g L}^{-1}$  de B, associada com Si ( $12 \text{ mmol L}^{-1}$ ), durante o cultivo da couve-flor.

## 7 REFERÊNCIAS

Adatia MH, Besford RT (1986) The effects of silicon on cucumber plants grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany** 58:343-351.

Ahmad W, Zia MH, Malhi SS, Niaz A, Saifullah (2012) Boron deficiency in soils and crops: a review. In: GOYAL, Aakash. **Crop Plant** 77-114.

Ahmad A, Tahir M, Ullah E, Naeem M, Ayub M, Haseeb-ur-Rehman, Muhammad (2012) Effect of silicon and boron foliar application on yield and quality of rice. **Pakistan Journal of Life and Social Sciences** 161-165.

Ahmed AHH, Harb EM, Higazy MA, Morgan SH (2008) Effect of silicon and boron foliar applications on wheat plants grown under saline soil conditions. **International Journal of Agricultural Research** 1-26.

Al-Aghabary K, Zhu Z, Shi Q (2004) Influence of silicon supply on chlorophyll content, chlorophyll fluorescence, and antioxidative enzyme activities in tomato plants under salt stress. **Journal of Plant Nutrition** 27:2101-2115.

Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, Karanov E (2012) The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant Cell Environ** 24:1337-1344.

Alves AU, Prado RM, Gondim ARO, Correia MAR, Cecílio Filho AB (2020) Lack and accumulation of boron in the leaves after foliar spraying in cabbage and cauliflower plants. **Científica** 48:76-24.

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani PR, Gallo JR (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico. Boletim Técnico v.78).

Barbosa JC, Maldonado Júnior W (2016) **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp.

Berger S, Sinha AK, Roitsch T (2007) Plant physiology meets phytopathology: plant primary metabolism and plant-pathogen interactions. **Journal of Experimental Botany** 58:4019-4026.

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

Chaudhari VJ, Patel NK, Tandel BM, Vibhuti C (2017) Effect of foliar spray of micronutrients on growth and yield of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *Botrytis*). **International Journal of Chemical Studies** 1133-1135.

Choi W, Chen KY (1979) Evaluation of boron removal by adsorption on solids. **American Chemical Society** 13:189-196.

Deus ACF, Prado RM, Alvarez RCF, Oliveira RLL, Felisberto G (2019) Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon** 12:997-1005.

Farhangi-Abriz S, Torabian S (2018) Nano-silicon alters antioxidant activities of soybean seedlings under salt toxicity. **Protoplasma** 255:953-962.

Ferraz RLS, Magalhães ID, Beltrão NEM, Melo AS, Brito Neto JF, Rocha MS (2015) Photosynthetic pigments, cell extrusion and relative leaf water content of the castor bean under silicon and salinity. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 19:841-848.

Goldbach HE, Yu Q, Wingender R, Schulz M, Wimmer M, Findeklee P, Baluška F (2001) Rapid response reactions of roots to boron deprivation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 164:173-181.

Guerriero G, Hausman J, Legay S (2016) Silicon and the plant extracellular matrix. **Frontiers in Plant Science** 7:1-8.

Gunes A, Inal A, Bagci EG, Coban S, Sahin O (2007) Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. **Biologia Plantarum** 51:571-574.

Hajiboland R, Farhanghi F (2010) Remobilization of boron, photosynthesis, phenolic metabolism and anti-oxidant defense capacity in boron-deficient turnip (*Brassica rapa* L.) plants. **Soil Science Plant Nutrition** 56:427-437.

Heath RL, Packer L (1968) Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics** 125:189-198.

Hoagland DR, Arnon DI (1950) The water-culture method for growing plants without soil. **Circular** 347:1–32.

Hu H, Brown PH (1994) Localization of boron in cell walls of squash and tobacco and its association with pectin (evidence for a structural role of boron in the cell wall). **Plant Physiology** 105:681-689.

Inanaga S, Okasaka A, Tanaka S (1995) Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **Soil Science and Plant Nutrition** 41:111-117.

İşkil R, Surgun-Acar Y (2018) Expression analysis of cell wall assembly and remodelling-related genes in *Arabidopsis* roots subjected to boron stress and brassinosteroid at different developmental stages. **Acta Botanica Brasilica** 32:546-554.

Kim SG, Kim KW, Park EW, Choi D (2002) Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. **Phytopathology** 92:1095-1103.

Kim YH, Khan AL, Waqas M, Lee IJ (2017) Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A Review. **Frontiers in Plant Science** 8:1-7.

Kooten O, Snel JFH (1990) The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. **Photosynthesis Research** 3:147–150.

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (2004) **Análise de silício: solo, planta e fertilizantes**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 34p. (Boletim técnico n.2).

Koshiba T, Kobayashi M, Match T (2009) Boron deficiency. **Plant Signaling and Behavior** 4:557-558.

Kotur SC (1998) Standardisation of foliar spray of boron for correction of brown rot and for increasing yield of cauliflower (*Brassica oleracea convar botrytis* var *botrytis*) in Bihar plateau. **Indian Journal of Agricultural Sciences** 68:218-221.

Li M, Zhao Z, Zhang Z, Zhang W, Zhou J, Xu Fangsen, Liu X (2017) Effect of boron deficiency on anatomical structure and chemical composition of petioles and photosynthesis of leaves in cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Scientific Reports** 7:1-9.

Liang Y (1999) Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under. **Plant and Soil** 209:217-224.

Liang Y, Chen Q, Liu Q, Zhang W, Ding R (2003) Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). **Journal of Plant Physiology** 160:1157-1164.

Lichtenthaler HK (1987) Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods in Enzymology** 148:350-382.

Loomis WD, Durst RW (1992) Chemistry and biology of boron. **Biofactors** 3:229-239.

Ma JF, Takahashi E (2002) **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Elsevier.

Maghsoudi K, Emam Y, Ashraf M (2015) Influence of foliar application of silicon on chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, and growth in water-stressed wheat cultivars differing in drought tolerance. **Turkish Journal of Botany** 39:625-634.

Match T, Kawaguchi S, Kobayashi M (1996) Ubiquity of a borate-rhamnogalacturonan II complex in the cell walls of higher plants. **Plant and Cell Physiology** 37:636-640.

May A, Tivelli SW, Vargas PF, Samra AG, Sacconi LV, Pinheiro MQ (2007) **A cultura da couve-flor**. Campinas: IAC 36.

Nikolic DB, Nestic S, Bosnic D, Kostic L, Nikolic M, Samardzic JT (2019) Silicon alleviates iron deficiency in barley by enhancing expression of strategy II genes and metal redistribution. **Frontiers in Plant Science** 10:1-12.

Oliveira RLL, Prado RM, Felisberto G, Checchio MV, Gratão PL (2019) Silicon mitigates manganese deficiency stress by regulating the physiology and activity of antioxidant enzymes in sorghum plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 19:524-534.

Padbhushan R, Kumar D (2017) Fractions of soil boron: a review. **The Journal of Agricultural Science** 155:1023-1032.

Prado RM (2020) **Nutrição de plantas**. 2 ed São Paulo: Editora Unesp 414.

Prychid CJ, Rudall PJ, Gregory M (2003) Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. **The Botanical Review** 69:377-440.

Queen A (1977) The kinetics of the reaction of boric acid with salicylic acid. **Canadian Journal of Chemistry** 55:3035-3039.

Rodrigues F, Oliveira LA, Korndörfer AP, Korndörfer GH (2011) Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agronômicas** 14-20.

Sá AA, Ernani PR (2016) Boron leaching decreases with increases on soil pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 40:1-7.

Sabater B, Rodriguez MT (1978) Control of chlorophyll degradation in detached leaves of barley and oat through effect of kinetin on chlorophyllase levels. **Physiologia Plantarum** 43:274-276.

Singleton VL, Rossi JA (1965) Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture** 16:144-158.

Souza JZ, Prado RM, Silva SLO, Farias TP, Garcia Neto J, Souza Junior JP (2018) Silicon leaf fertilization promotes biofortification and increases dry matter, ascorbate content, and decreases post-harvest leaf loss of chard and kale. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 50:164-172.

Strohecker R, Zaragoza FM, Henning HM (1967) **Análisis de vitaminas: métodos comprobados**, Editora Paz Montolvo, Madrid, 428.

Tanaka M, Fujiwara T (2008) Physiological roles and transport mechanisms of boron: perspectives from plants. **European Journal of Physiology** 456:671-677.



Trani PE, van. Raij B. Hortaliças. In: van. Raij B, Cantarella H, Quaggio JÁ, Furlani AMC (1997) **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 175. (Boletim técnico, 100).

Tripathy BC, Oelmüller R (2012) Reactive oxygen species generation and signaling in plants. **Plant Signaling Behavior** 7:1621-1633.

Verma KK, Liu XH, Wu KC (2019) The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon** 12:1355-1367.

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

Zhou T, Hua Y, Zhang B, Zhang X, Zhou Y, Shi L, Xu F (2017) Low-boron tolerance strategies involving pectin-mediated cell wall mechanical properties in brassica napus. **Plant and Cell Physiology** 58:1991-2005.

Zhu Z, Wei G, Li J (2004) Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.) **Plant Science** 167:527-533.