

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

**ESTRATÉGIA PARA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E
A SINERGIA COM SILÍCIO EM PLANTAS DE BRÓCOLIS**

Paulo Gonçalves da Silva
Engenheiro Agrônomo

2024

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

**ESTRATÉGIA PARA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E
A SINERGIA COM SILÍCIO EM PLANTAS DE BRÓCOLIS**

Paulo Gonçalves da Silva
Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientador: Dr. Jonas Pereira de Souza Júnior

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 (Produção Vegetal)

2024

S586e

Silva, Paulo Gonçalves da

Estratégia para pulverização foliar de boro e a sinergia com silício em plantas de brócolis / Paulo Gonçalves da Silva. -- Jaboticabal, 2024

26 p.

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

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientador: Jonas Pereira de Souza Junior

1. Micronutrientes. 2. Desordem nutricional. 3. Brassica oleracea var.italica. 4. Elemento benéfico. 5. Nutrição boratada. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTRATÉGIA PARA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E A SINERGIA COM SILÍCIO EM PLANTAS DE BRÓCOLIS

AUTOR: PAULO GONÇALVES DA SILVA

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADOR: JONAS PEREIRA DE SOUZA JÚNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATO DE MELLO PRADO
Data: 22/07/2024 12:17:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente
gov.br GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA
Data: 24/07/2024 20:40:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. GELZA CARLIANE MARQUES TEIXEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia / Instituto Federal do Tocantins (IFTO) - Lagoa da Confusão/TO

Prof. Dr. FÁBIO LUIZ CHECCHIO MINGOTTE (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br FABIO LUIZ CHECCHIO MINGOTTE
Data: 24/07/2024 10:09:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 22 de julho de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Paulo Gonçalves da Silva, nascido em Rolim de Moura – RO, Brasil, em 08 de janeiro de 1997, filho de Elizete Gonçalves da Silva e Izaias Michelino da Silva. Possui curso técnico em agropecuária (2014) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia, Campus Ariquemes – RO, e graduação em Engenharia Agrônômica (2022) pelo Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas (IEAA/UFAM) – Humaitá – AM. Durante a graduação fui membro do grupo de pesquisa solo e ambiente amazônico. Fui bolsista no programa de extensão no período de 2017 a 2018, iniciação científica no período de 2018 a 2019 e monitor da disciplina de Construções Rurais. Em 2022 iniciou o curso de Mestrado pelo programa de Pós-graduação em agronomia (Produção Vegetal) na Unesp/FCAV, realizando pesquisa relacionadas ao uso do silício aplicado via foliar na mitigação de estresses abióticos, com foco no déficit de micronutriente boro em brássicas. Atualmente é membro do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da UNESP (GENPLANT).

“Maldito é o homem que confia nos homens, que faz da humanidade mortal a sua força, mas cujo coração se afasta do senhor”.

Jeremias 17:5

Aos meus pais Izaias Michelino da Silva e Elizete Gonçalves da Silva,
Meus irmãos Shirley Gonçalves da Silva, Izaque Gonçalves da Silva, Sadraque
Michelino Gonçalves e Sara Gonçalves da Silva, pelo apoio incondicional, pelos
ensinamentos e por nunca desistirem de mim.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente por me permitir chegar até aqui e nunca me abandonar nos momentos difíceis.

A meus pais Elizete Gonçalves da Silva e Izaias Michelino da Silva, agradeço por todo amor e carinho e por sempre acreditar que eu seria capaz de vencer.

Agradeço a todos os meus irmãos, que foram fundamentais para o meu sucesso. Ao meu irmão Sadraque Michelino Gonçalves, por sempre me chamar a atenção e me manter motivado, e a Sara Gonçalves da Silva, Izaque Gonçalves da Silva e Shirley Gonçalves da Silva, por estarem sempre ao meu lado em qualquer situação, pelos momentos de alegria compartilhados e pelo apoio constante.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pelas oportunidades oferecidas ao longo destes anos de trabalho.

Ao meu coorientador Dr. Jonas Pereira de Souza Junior, que esteve disponível para me acompanhar durante o processo.

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 (Produção Vegetal).

Aos meus amigos Patrícia, Carlos, João Paulo e Anderson por estarem comigo em todos os momentos importantes de minha vida, sempre compartilhando sorrisos nas alegrias e apoio nas dificuldades.

A minha companheira Alexsandra Maciel Pereira, pela paciência, apoio e companheirismo, sempre deixando claro que estará presente em todos os momentos de minha vida.

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

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

Agradeço infinitamente a todos os que fizeram parte!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Deficiência de boro	3
2.2. Importância do silício para as plantas e sua interação com o boro na nutrição vegetal	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	6
3.1. Condições de crescimento das plantas.....	6
3.2. Desenho experimental e tratamentos	8
3.3. Aplicação foliar nos tratamentos	9
4. AVALIAÇÕES	10
4.1. Clorofilas, carotenoides e feofitinas	10
4.2. Diâmetro, altura, número de folhas, massa fresca e seca da folha.....	10
4.3. Teor de B foliar.....	11
4.4. Análise estatística	11
5. RESULTADOS	11
5.1. Teor de boro em folha de plantas de brócolis	11
5.2. Pigmentos fotossintéticos	12
5.3. Biometria e produção de massa fresca e seca de plantas de brócolis...	13
6. DISCUSSÃO	16
6.1. Importância do B fornecido via raiz a partir da solução nutritiva em plantas de brócolis.....	16
6.2. Novas estratégias para pulverização foliar de B associada ao Si em plantas de brócolis deficientes de B	17
7. CONCLUSÃO	19
8. REFERÊNCIAS	19

ESTRATÉGIA PARA PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE BORO E A SINERGIA COM SILÍCIO EM PLANTAS DE BRÓCOLIS

RESUMO - A aplicação foliar de boro (B) tem sido amplamente utilizada na produção de brássicas, como os brócolis, para atender às suas necessidades nutricionais. No entanto, ainda há carência de informações sobre os efeitos da utilização do elemento benéfico silício (Si) nesse contexto. O presente estudo teve como objetivo investigar a viabilidade da aplicação foliar de B e Si, isolados e associados, em plantas de brócolis cultivadas sob deficiência de B, e seu impacto na nutrição, fisiologia e crescimento. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e 10 repetições, totalizando 50 unidades amostrais. O grupo de controle consistiu em plantas sem deficiência de B, enquanto os outros quatro tratamentos foram aplicados via foliar em plantas cultivadas sob deficiência do micronutriente. Esses tratamentos foram: água (-B-Si), B (+B-Si), Si (-B+Si) e combinação de B com Si (+B+Si). Aos 120 dias de cultivo iniciou-se as avaliações sendo determinadas conteúdo de pigmentos fotossintéticos, teor foliar de B, altura, diâmetro, número de folhas e massa fresca e seca das folhas. A deficiência de B causou aumento do estresse oxidativo nas plantas, reduziu o conteúdo de pigmentos fotossintéticos, a altura das plantas e a produção de massa fresca e seca das folhas. A pulverização foliar de B e de B+Si é capaz de corrigir a deficiência de B ao aumentar teores de clorofila, carotenóides, feofitina e o crescimento das plantas de brócolis tendo resultados semelhantes ao fornecimento do B via raiz. Este estudo indica que a nutrição boratada para brócolis pode ser recomendada tanto via raiz ou foliar sem a necessidade de inclusão do Si na calda de pulverização.

Palavras-chave: Micronutriente, Desordem nutricional, *Brassica oleracea var. italica*, Elemento benéfico, Nutrição boratada.

STRATEGY FOR FOLIAR SPRAYING OF BORON AND SYNERGY WITH SILICON IN BROCCOLI PLANTS

ABSTRACT – Foliar application of boron (B) has been widely used in the production of brassicas, such as broccoli, to meet their nutritional needs. However, there is still a lack of information regarding the effects of the beneficial element silicon (Si) in this context. The present study aimed to investigate the feasibility of foliar application of B and Si, individually and combined, in broccoli plants grown under B deficiency, and its impact on nutrition, physiology, and growth. The experiment was conducted in a greenhouse, using a completely randomized design with five treatments and 10 replicates, totaling 50 sample units. The control group consisted of plants without B deficiency, while the other four treatments were applied via foliar spray in plants grown under B deficiency. These treatments were: water (-B-Si), B (+B-Si), Si (-B+Si), and a combination of B with Si (+B+Si). At 120 days of cultivation, evaluations were initiated, and chlorophyll content, leaf B concentration, plant height, diameter, number of leaves, and fresh and dry mass of the leaves were determined. B deficiency increased oxidative stress in the plants, reduced chlorophyll content, plant height, and the production of fresh and dry leaf mass. Foliar spraying of B and B+Si was able to correct B deficiency by increasing chlorophyll, carotenoid, pheophytin contents, and the growth of broccoli plants, with results similar to those achieved by supplying B via the roots. This study indicates that boron nutrition in broccoli can be recommended either via roots or foliar spray without the need for the inclusion of Si in the spray solution.

Key words: Micronutrient, Nutritional disorder, *Brassica oleracea var. italica*, Beneficial element, Blurred nutrition.

1. INTRODUÇÃO

As plantas de brócolis, pertencentes à família das Brassicaceae são exigentes em boro (B) (Trani et al., 2022). A deficiência deste nutriente é amplamente observada em campos agrícolas ao redor do mundo (Uluisik et al., 2018), e o cultivo em solos com alta acidez favorece a solubilidade de B e agrava o processo de lixiviação, (Jehangir et al., 2017), especialmente em regiões de alta precipitação pluvial (Malavolta, 1980).

Em plantas deficientes de B ocorrem danos na formação da parede celular, prejuízos no transporte de carboidratos e crescimento reprodutivo (Prado, 2021). A deficiência de B, resulta também na produção excessiva de espécies reativas de oxigênio (ERO) e pode causar alterações morfológicas, bioquímicas e metabólicas, diminuindo a integridade das membranas celulares (Camacho-Cristóbal et al., 2011). A elevação das ERO é uma sinalização da planta de estresses ambientais (Choudhury et al., 2017), e culmina na morte celular (Dodd et al., 2010), fato já observado em algumas culturas com deficiência deste micronutriente, como algodão (Souza Júnior et al., 2022b), colza (Zhou et al., 2017) e couve-flor (Silva et al., 2021). Em adição, o estresse oxidativo induzido pela deficiência de B, pode induzir a degradação e diminuição dos pigmentos fotossintéticos foliares, causando prejuízos ao aparato fotossintético (Loconsole e Santamaria, 2021). No entanto, esses efeitos de prejuízos da deficiência de B na fisiologia das plantas, ainda não foram estudados para plantas de brócolis, sendo desconhecido se esses processos fisiológicos constituem os principais eventos que levam diminuição do crescimento desta espécie.

Diante da importância do B na nutrição da planta, especialmente em brássicas que são sensíveis a deficiência deste nutriente (Filgueira, 2012), e diante da expansão do seu cultivo no mundo, é importante definir novas estratégias para melhorar a eficiência da fertilização boratada em bases sustentáveis, sem risco para o ambiente. Uma alternativa promissora seria o uso do silício (Si), pois, estudos recentes indicam que esse elemento, fornecido via foliar, tem promovido resultados promissores na atenuação de desordens nutricionais de B em ervilha (Oliveira et al., 2019) e em algodão (Souza Júnior et al., 2022a; Souza Júnior et al., 2022b).

Recentemente, a interação entre o Si e a deficiência de micronutrientes tem recebido atenção, pois o Si atua reduzindo o estresse oxidativo e aumentando o crescimento das plantas (Khan et al., 2023; Prado, 2023).

As plantas de brócolis são classificadas como não acumuladoras de Si, por não apresentarem transportadores eficientes para absorção do elemento benéfico da solução do solo e ter baixo transporte do elemento das raízes para a parte aérea da planta (Deshmukh et al., 2020). Nestas espécies não acumuladoras de Si, uma estratégia para aumentar a quantidade de Si na parte aérea poderia ser com emprego da pulverização foliar. O uso de fontes solúveis de Si, aplicadas via foliar, tem provado ser eficiente em incrementar o teor foliar do elemento benéfico em diversas plantas não acumuladoras, incluindo brássicas (Silva et al., 2021).

A aplicação foliar de B em cultivos de brássicas em áreas com deficiência deste nutriente é uma prática comum realizada pelos produtores (Trani et al., 2022). Diante das pesquisas recentes com Si, que podem beneficiar plantas com deficiência de B, e da necessidade de potencializar eficiência das pulverizações foliares, torna-se pertinente se testar a estratégia de uso conjunto destes dois elementos em calda de pulverização, desde que não ocorra o processo de polimerização de Si. Essa nova abordagem, incluindo o Si e o B na mesma calda de pulverização, tem despertado interesse dos pesquisadores (Silva et al., 2021; Sousa Junior et al., 2022; Cardoso et al., 2022; Rabeh et al., 2023). No entanto, a aplicação conjunta destes elementos tem limitação em relação ao risco de polimerização do Si ($\text{SiO}_2 \text{ n H}_2\text{O}$), tornando-o indisponível para absorção da planta, pois o elemento é absorvido na forma H_4SiO_4 (Marschner, 2011). Esse problema tem sido vencido com novas fontes estáveis, contendo B e Si, que vêm sendo testadas pelo nosso grupo de pesquisa em diferentes estudos (Cardoso et al., 2022; Souza Júnior et al., 2022a; Souza Júnior et al., 2022b). Essas pesquisas demonstraram o uso do B+Si promove ótima absorção destes dois elementos e tem efeito somatório atenuante da deficiência de B, reduzindo o dano oxidativo e incrementando o crescimento das plantas, como observado em algodoeiro (Souza Júnior et al., 2022a). Contudo, essas informações permanecem desconhecias em plantas de brócolis.

Embora promissores, os estudos sobre aplicação associada de B e Si ainda não são suficientes para aferir a efetividade da possível sinergia entre estes

elementos quando aplicados na mesma calda para pulverização foliar, pois é necessário a compreensão dos mecanismos fisiológicos e nutricionais envolvidos. Além disso, é importante estudos que possam abordar diferentes culturas, pois a morfologia foliar é alterada entre as espécies, o que pode afetar a absorção destes elementos na planta e a expectativa de resposta.

Para avançar neste conhecimento, é importante testar as hipóteses: i) a deficiência de B prejudica o crescimento das plantas de brócolis, possivelmente por incrementar o estresse e a degradação de pigmentos fotossintetizantes, e, se sim, ii) a pulverização foliar de B ou de Si, isoladamente ou associados, pode atenuar os efeitos deletérios da deficiência de B, resultando em aumento no crescimento de plantas de brócolis cultivadas sob deficiência de B.

Para testar essas hipóteses, realizou-se essa pesquisa tendo como objetivo avaliar o efeito da aplicação da aplicação foliar de B e de Si, isolados e associados, em plantas de brócolis sob deficiência de B, nos compostos antioxidantes não enzimáticos, na produção de pigmentos, no crescimento e na produção foliar de biomassa fresca e seca.

Se essas hipóteses forem aceitas será possível compreender melhor a sinergia B e Si em plantas de brócolis e isso possibilitará implementar nova estratégia para potencializar a pulverização foliar de B, que é comum em brássicas, a partir da inclusão do Si na calda sem risco para o ambiente. Isso deverá ampliar a sustentabilidade deste cultivo, pois se trata de uma espécie sensível a deficiência de B e cultivada em muitas regiões do mundo com teores de B insuficiente no meio de cultivo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Deficiência de boro

A matéria orgânica é a principal fonte de B para as plantas. Assim, solos com baixo teor de matéria orgânica ou baixa mineralização desta matéria orgânica, podem apresentar um nível crítico de B no solo, para uma adequada nutrição da planta, sendo esta considerada baixa se estiver ($<0,20\text{mg dm}^{-3}$) (Prado, 2021).

A absorção de B ocorre na faixa de valores pH 4,0-8,0, sendo absorvido na forma de H_3BO_3 e H_2BO_3^- (Malavolta, 1980), sendo a forma de ácido bórico (H_3BO_3) a que predomina (Prado, 2021). A absorção do B é um processo passivo, sendo a sua taxa de absorção proporcional a sua disponibilidade no solo, isto se deve a elevada permeabilidade do ácido bórico a camada lipídica, sendo que a molécula de B não possui carga (Tanaka e Fujiwara, 2008).

O B se acumula nos locais de elevada taxa transpiratória, sendo sua redistribuição considerada ineficiente na maioria das espécies vegetais, apresentando sintomas de deficiência de e toxicidade nas folhas jovens e maduras (Tanaka e Fujiwara, 2008).

A importância do B na produção e na manutenção da planta se deve ao seu papel no metabolismo de ácidos nucleicos, metabolismo de carboidratos, e proteínas, metabolismo de ácido indol-acético, síntese da parede celular, estrutura da parede celular, integridade e função da membrana, metabolismo do fenol e no transporte de açúcares (Heiner et al., 2001; Marschner, 2011).

As plantas quando com deficiência de B, acabam tendo o desenvolvimento prejudicado, isto devido a deficiência de B reduzir a utilização da luz absorvida na fotossíntese, induzindo a oxidação de fenólicos prejudicando os mecanismos de defesa antioxidante de plantas, aumentando assim a suscetibilidade das plantas a alta intensidade de luz e geração de ERO (Marschner, 2011). O que acaba refletindo inibição do crescimento apical, necrose do terminal gemas, redução da expansão foliar, quebra de tecidos devido à fragilidade, aborto das flores e frutos (Brown et al., 2002).

Devido as concentrações de B se encontrarem baixas na maioria dos solos agrícolas e a sua natureza ser de fácil lixiviação em ambiente natural, a sua falta pode causar sérios problemas as lavouras. Logo, para complementar esta demanda de B, uma alternativa seria a aplicação de B foliar, que é amplamente utilizada nas áreas de cultivo. A indicação do B para cultivo de brássicas tem sido recomendado via foliar a partir de três pulverizações durante o ciclo do cultivo em campo (Triani et al., 2022). No entanto, em cultivos hidropônicos o B tem sido indicado via solução nutritiva mas existem dúvidas se a aplicação via foliar teria a mesma eficiência da aplicação do micronutriente via raiz.

2.2. Importância do silício para as plantas e sua interação com o boro na nutrição vegetal

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo sua principal forma absorvível pelas plantas o ácido monossilícico (H_4SiO_4), predominante em soluções de solo com pH inferior a 9,0 (Marschner, 2011). Essa forma é semelhante ao ácido bórico (H_3BO_3), tanto em suas propriedades químicas quanto em suas interações com as paredes celulares, especialmente pectinas e polifenóis (Marschner, 2011). No entanto, ao contrário do boro (B), cuja essencialidade para o desenvolvimento vegetal é amplamente reconhecida, o silício é considerado um elemento benéfico, mas não essencial (Epstein, 1999).

O boro, por sua vez, desempenha papel crucial na formação e estabilidade da parede celular vegetal, e sua deficiência pode causar deformidades graves em folhas, raízes e flores, além de comprometer a reprodução e o desenvolvimento de sementes em várias culturas (Shorrocks, 1997; Camacho-Cristóbal et al., 2008). Essa deficiência de B no cultivo ocorre especialmente em solos com valor $pH > 6$ que forma complexos insolúveis com óxido de Fe e Al (Niaz et al., 2007) e em solos com baixo teor de matéria orgânica que é principal fonte do micronutriente no solo (Prado, 2021) limitando o crescimento da planta.

O silício promove o fortalecimento das paredes celulares ao formar uma camada de sílica logo abaixo da cutícula da epiderme, o que reduz a perda de água e aumenta a resistência física das plantas a patógenos (Ma e Yamaji, 2015). Essa deposição também ajuda as folhas a permanecerem mais eretas, melhorando a captura de luz e, conseqüentemente, aumentando a eficiência fotossintética (Verma et al., 2020). Além disso, o Si desencadeia as moléculas de sinalização endógenas dentro das células e aumenta sua produção para um crescimento significativo da planta (Khan et al., 2023).

A deficiência de boro induz a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) nas células, o que pode danificar membranas e proteínas (Camacho-Cristóbal et al., 2008). O silício atua reduzindo a produção de ERO e estimulando a atividade de enzimas antioxidantes colaborando na proteção de estruturas celulares contra

danos oxidativos (Ranjan et al., 2021) e favorece a preservação dos pigmentos (Verma et al., 2020) e aumenta a eficiência no uso de água (Guntzer et al., 2012).

As concentrações ideais de silício e a forma de aplicação variam amplamente entre espécies e condições de cultivo. A absorção do Si pelas raízes é influenciada pela presença de compostos específicos (Ma et al., 2001). Assim, a implementação da técnica de pulverização do Si foliar podem reduzir os impactos nocivos dos estresses nutricionais, e manter o estado nutricional das plantas cultivadas em condições ambientais desfavoráveis (Khan et al., 2023).

Mais pesquisas são necessárias para verificar se a aplicação foliar de Si isolado pode mitigar a deficiência de B e se a associação do B+Si pode ou não potencializar o efeito do B via foliar no crescimento das plantas cultivadas sob deficiência de B.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Condições de crescimento das plantas

O experimento foi desenvolvido com plantas de brócolis (*Brassica oleraceae* L. var. itálica) entre outubro de 2022 a janeiro de 2023, sob sistema de cultivo sem solo, em casa de vegetação, do departamento de Ciência do Solo, da Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, Brasil. Durante o período experimental, foi obtida a temperatura do ar (máxima: $38,9 \pm 7,8$; mínima: $18,4 \pm 4,0$) e a umidade relativa do ar (máxima: $89,9 \pm 2,0$; mínima: $29,2 \pm 9,0$), medida no interior da casa de vegetação com uso de termohigrômetro (Figura 1). A casa de vegetação apresentava estrutura de alvenaria, com revestimento de tela metálica nas paredes frontais e laterais, com cobertura composta de placas de vidro transparente. A estrutura superior possuía telas de polietileno da cor preta com 30% de sombreamento, sendo as mesmas retrateis e permanecia estendido das 11h00min às 16h00min durante o dia, evitando excesso de luminosidade e de temperatura.

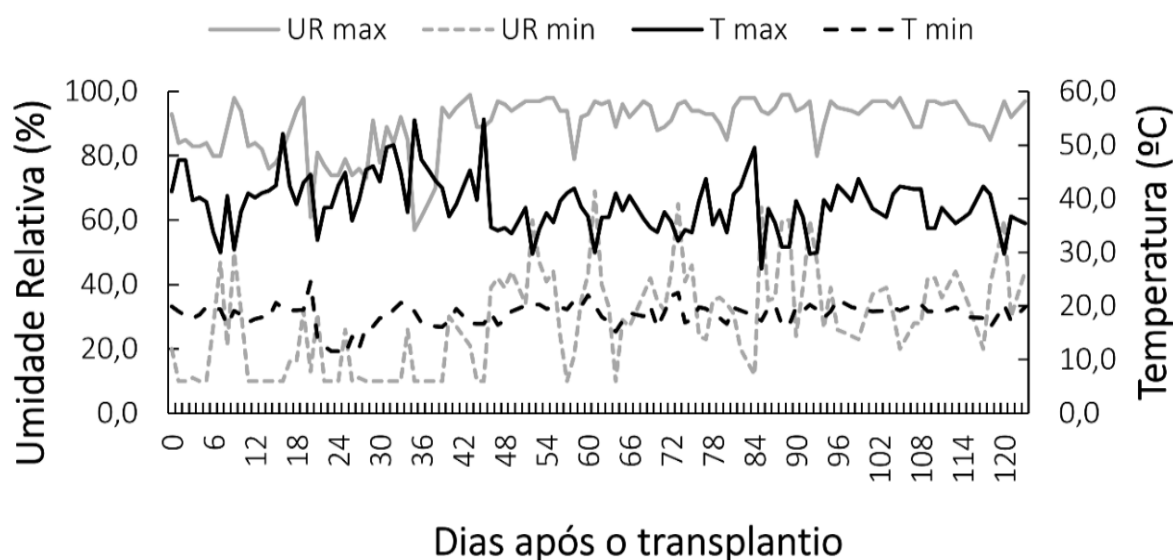


Figura 1. Umidade relativa mínima (UR min. %) e máxima (UR máx. %), temperatura mínima (T° min.) e máxima (T° max.) do ar no interior da casa e vegetação durante o período experimental.

A unidade experimental foi constituída por um vaso de polipropileno com capacidade para 5 dm³ (diâmetro superior: 23 cm; diâmetro inferior: 16 cm; altura: 16,5 cm), preenchido com 4 dm³ de areia de textura média, previamente lavada, utilizando solução de HCl (1%) e água deionizada. As mudas foram transplantadas com cerca de 20 dias após emergência contendo 8-10 cm de altura e 3 a 4 folhas, mantendo uma planta por vaso.

Utilizou-se solução nutritiva indicada por Hoagland e Arnon (1950), com substituição da fonte de Fe de Fe-EDTA para Fe-EDDHA, conforme proposto por Prado (2021), e modificação na concentração de B, de acordo com cada tratamento. O valor pH da solução nutritiva foi ajustado para $5,8 \pm 0,1$ utilizando solução de ácido clorídrico (1M) e hidróxido de sódio (1M).

A solução nutritiva foi aplicada a 20% da concentração total nos primeiros 4 dias após o transplântio das mudas. Após este período, a concentração foi aumentada para 50% por mais 4 dias e, posteriormente, para 75%, a qual foi mantida até o final do experimento.

Os vasos foram drenados uma vez a cada 15 dias para eliminar o excesso de sais e evitar salinização do substrato. Para este processo, foi adicionado 1 L de água ao substrato (areia) de cada vaso para drenagem de solução nutritiva, que foi

então descartada. Após 2 horas, uma nova solução nutritiva foi fornecida às plantas. Este procedimento foi realizado durante todo o período experimental, sendo regularmente fornecido os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas.

Para garantir a uniformidade do desenvolvimento das plantas, os blocos foram rotacionados a cada sete dias dentro da casa de vegetação, evitando a interferência do ambiente.

3.2. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi delineado em blocos ao acaso contendo cinco tratamentos sendo aplicação foliar de B ($0,30 \text{ g L}^{-1}$), de Si ($0,34 \text{ g L}^{-1}$), e de B +Si ($0,30 \text{ g L}^{-1}$ de B + $0,34 \text{ g L}^{-1}$ de Si) em plantas deficientes de B; aplicação foliar de água em plantas deficientes de B, e um tratamento controle (sem deficiência de B e sem aplicação foliar), em dez repetições.

O ácido bórico (17% de B) foi utilizado como fonte de B. No tratamento controle, foi aplicado $46 \mu\text{mol L}^{-1}$ de B via solução nutritiva, correspondente a 100% da concentração indicada por Hoagland e Arnon (1950). Nos demais tratamentos, que receberam as diferentes pulverizações foliares, foi aplicado $4,6 \mu\text{mol L}^{-1}$ de B via solução nutritiva. Esse valor foi baseado na indicação de Silva et al., (2021) para induzir deficiência moderada de B em brássicas.

O silicato de potássio estabilizado com sorbitol ($137,00 \text{ g L}^{-1}$ de Si; $164,4 \text{ g L}^{-1}$ de K_2O ; pH = 11,6; e 100 mL L^{-1} de sorbitol) foi utilizado como fonte de Si. As concentrações de B e de Si na pulverização foliar foram definidas conforme proposto por Silva et al. (2021).

O K foi balanceado, nos tratamentos sem Si, a partir da aplicação de cloreto de potássio ($0,20 \text{ g L}^{-1} \text{ K}$).

Todos os tratamentos receberam adjuvante mineral (Assist EC a 1% v/v) na calda de pulverização para aumentar a o espalhamento e absorção.

3.3. Aplicação foliar nos tratamentos

O valor pH dos tratamentos foi ajustado para $7,0 \pm 0,1$ antes da pulverização foliar. As soluções foram preparadas de acordo com os diferentes tratamentos e imediatamente aplicadas nas plantas com pulverizador manual, de forma a cobrir toda a parte área da planta. Foram realizadas nove aplicações foliares, iniciando aos 20 dias após o transplântio e seguindo intervalo de 10 dias.

Durante as aplicações foliares, a superfície dos vasos foi coberta com algodão para evitar o escoamento da solução aplicada na parte aérea da planta para o substrato, para garantir que todo o B aplicado atingisse apenas as folhas, sem contato com as raízes.

As pulverizações foliares ocorreram no período noturno (19h – 00h). Na ocasião, foi realizado monitoramento de dados meteorológicos com auxílio de termohigrômetro sendo verificada umidade relativa do ar $> 80\%$ e temperatura do ar $< 30^{\circ}\text{C}$ (Tabela 1). Estas condições ambientais são consideradas adequadas para a realização da pulverização foliar a fim de potencializar a absorção durante o processo passivo dos elementos químicos (Prado, 2021).

Tabela 1. Dados da T (temperatura, $^{\circ}\text{C}$) e da UR (umidade relativa, %) no momento da aplicação dos tratamentos com as pulverizações foliares

Dias (DAT)	T ($^{\circ}\text{C}$)	UR (%)
20	24,5	75
33	24,0	70
44	22,5	79
54	22,1	93
64	24,2	82
75	23,0	89
84	21,3	90
94	29,4	82
107	25,3	83

DAT: "Dias após o transplântio", indicando o número de dias contados a partir do momento em que as mudas foram transplântadas para o local definitivo.

3.4. AVALIAÇÕES

As avaliações foram realizadas no período de 120 a 135 dias após o transplântio da cultura, conforme descrito a seguir. Foram utilizadas cinco repetições para pigmentos, dez repetições para os parâmetros biométricos e quatro repetições para determinar o teor de boro.

3.5. Clorofilas, carotenoides e feofitinas

A quantificação das clorofilas (a e b), carotenoides e feofitinas (a e b) foram realizadas como indicado por Lichtenthaler (1987). Para isso, foram coletadas 5 discos foliares com peso aproximado de 0,025 a 0,030 g do terço médio das plantas e armazenados em tubos eppendorf de 1,5 mL com acetona 80% por 72 horas para despigmentação. Para a realização das leituras foram feitas as diluições do conteúdo de pigmentos extraído dos discos foliares com acetona 80% na proporção de 50% de extrato de pigmentos e 50% de acetona 80%, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro (BECKMAN, DU 640) na faixa de 470 nm para carotenoides, 663 nm para clorofila a, 647 nm para clorofila b, 665 e 653 para feofitina a e b respectivamente.

3.6. Diâmetro, altura, número de folhas, massa fresca e seca da folha

O diâmetro do colo da planta foi coletado com o uso do paquímetro, sendo a medida aferida a 1 cm do contato do colo da planta com o substrato. A medida da altura de plantas foi realizada com régua milimetrada, contando a partir da base de crescimento da planta até sua extremidade. O número de folhas foi aferido partir da contagem de folhas completamente desenvolvidas, ou seja, com a expansão completa do tecido vegetal.

A massa fresca da folha foi mensurada após a coleta das plantas. Após a pesagem do material fresco, as amostras foram lavadas em água deionizada, solução detergente (0,1% v/v), solução ácida (0,3% HCl v/v) e água deionizada e em seguida acomodadas em sacos de papel. Em seguida a lavagem, as sessões foram

levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar (65 ± 5 °C) até obtenção de massa constante. A massa seca da folha foi determinada com o auxílio de uma balança analítica.

3.7. Teor de B

Realizou-se a coleta de todas as folhas das plantas aos 16 dias após a última pulverização dos tratamentos foliares.

O teor de B nas folhas foi determinado pelo método de azometina-H sendo realizado digestão seca por queima em mufla (400 °C), seguido por reação colorimétrica com azometina em meio ácido e leitura foi realizada com auxílio do espectrofotômetro (420 nm) (Bataglia et al., 1983)

3.8. Análise estatística

Inicialmente, os dados foram submetidos ao tratamento de outliers utilizando o método do intervalo interquartil (IQR) com um fator de 1,5 para remoção de outliers. Em seguida, os dados foram submetidos a análise de variância (teste F), e quando significativos, ao teste de comparação de médias (Tukey) ($p < 0,05$), a partir do uso do Sisvar® (Ferreira, 2014).

4. RESULTADOS

4.1. Teor de boro em folha de plantas de brócolis

O maior teor de B na folha de planta de brócolis, foi observado nas plantas do tratamento controle (sem deficiência de B) em relação aos demais tratamentos (Figura 2). A aplicação foliar de B de forma isolada ou associada com o Si (B+Si) em relação a aplicação de apenas água não foi eficaz em incrementar o teor do micronutriente nas folhas (Figura 2).

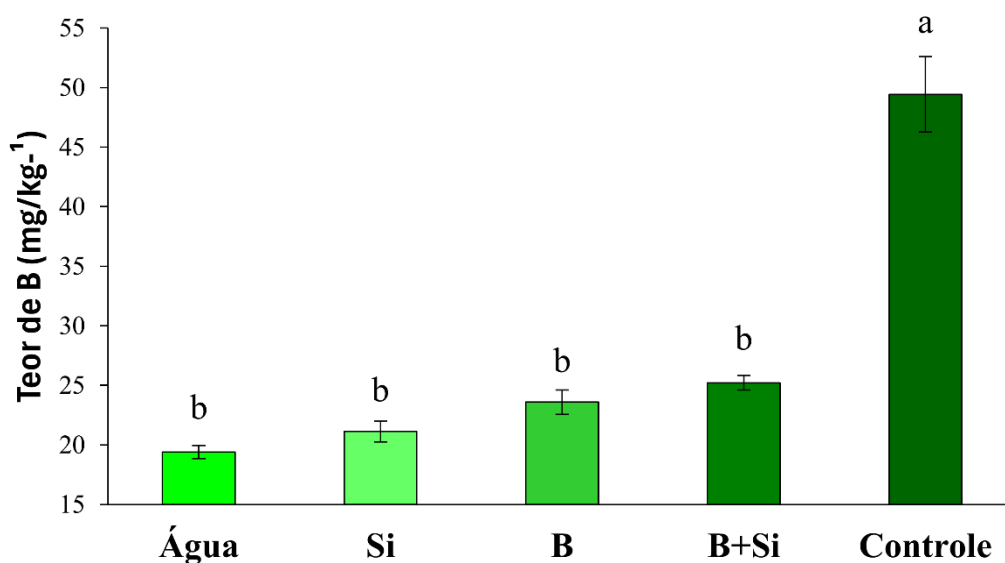


Figura 2. Teor foliar de boro em plantas de brócolis cultivadas sob suficiência de B em solução nutritiva (controle) e deficiência de B em solução nutritiva com diferentes tratamentos foliares boro (B), silício (Si), boro + silício (B+Si) e somente água. Letras indicam diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos de acordo com o teste Tukey a 5% de probabilidade

4.2. Pigmentos fotossintéticos

A aplicação foliar de apenas água em relação aos demais tratamentos resultaram nos menores teores de clorofila *a* (Figura 3a), clorofila *b* (Figura 3b), carotenoides (Figura 3c), feofitina *a* (Figura 3d) e feofitina *b* (Figura 3e). A aplicação isolada de Si, de B e a aplicação associada de B+Si em relação ao tratamento com apenas água foram eficientes na manutenção dos conteúdos de clorofila *a* (Figura 3a) e carotenoides (Figura 3c), quando comparadas às plantas do tratamento água.

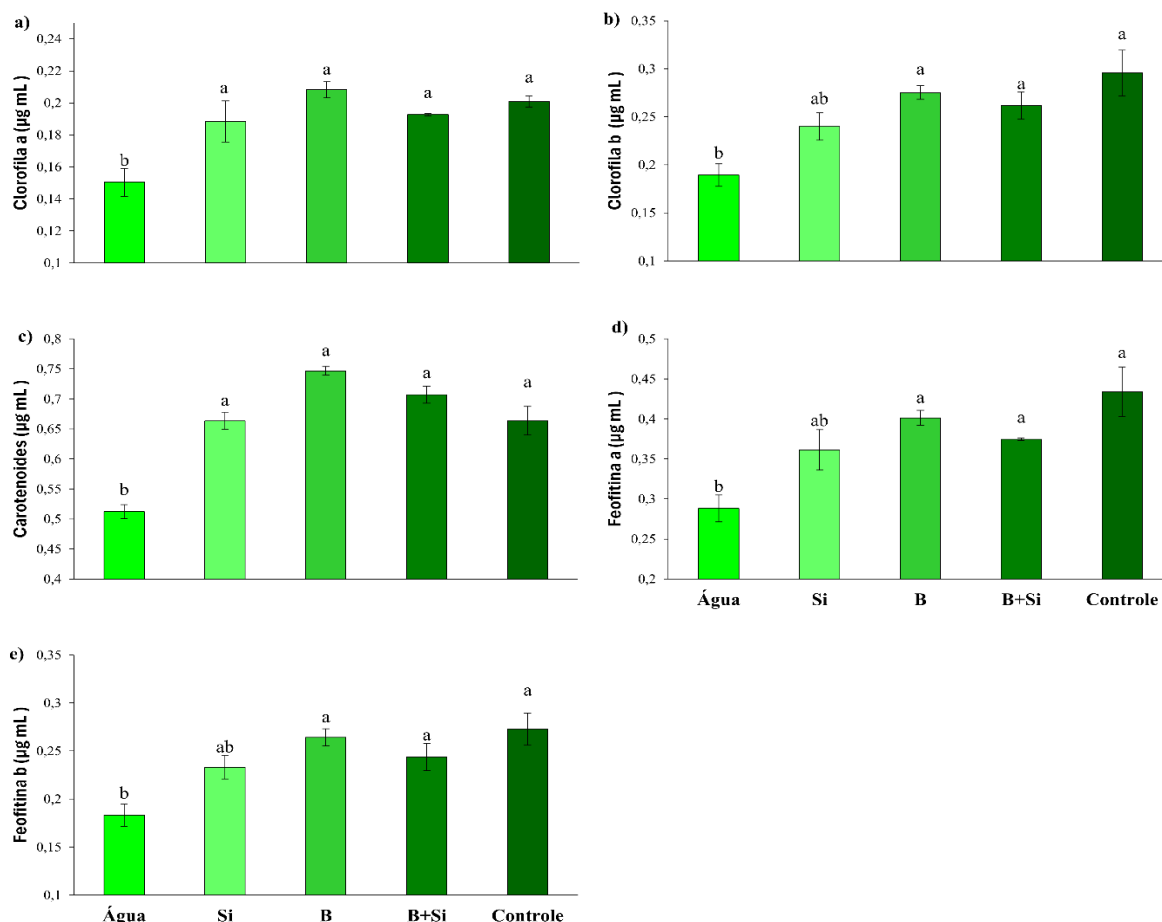


Figura 3. Teores de clorofila a (a), clorofila b (b), carotenóides (c), feofitina a (d) e feofitina b (e) em plantas de brócolis cultivadas sob suficiência de B em solução nutritiva (controle) e deficiência de B em solução nutritiva com diferentes tratamentos foliares boro (B), silício (Si), boro + silício (B+Si) e somente água. As letras indicam diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos, de acordo com o teste Tukey a 5% de probabilidade

4.3. Biometria e produção de massa fresca e seca de plantas de brócolis

A aplicação de apenas água em relação aos demais tratamentos promoveu incremento do diâmetro das plantas (Figura 4a).

A altura das plantas (Figura 4b), foi prejudicada pela deficiência de B, sendo observado menor valor para estas variáveis no tratamento água e Si, e os maiores no tratamento controle. O uso do tratamento controle se destacou dos tratamentos B e B+Si em relação aos demais tratamentos ao promoverem maior altura da planta (Figura 4b).

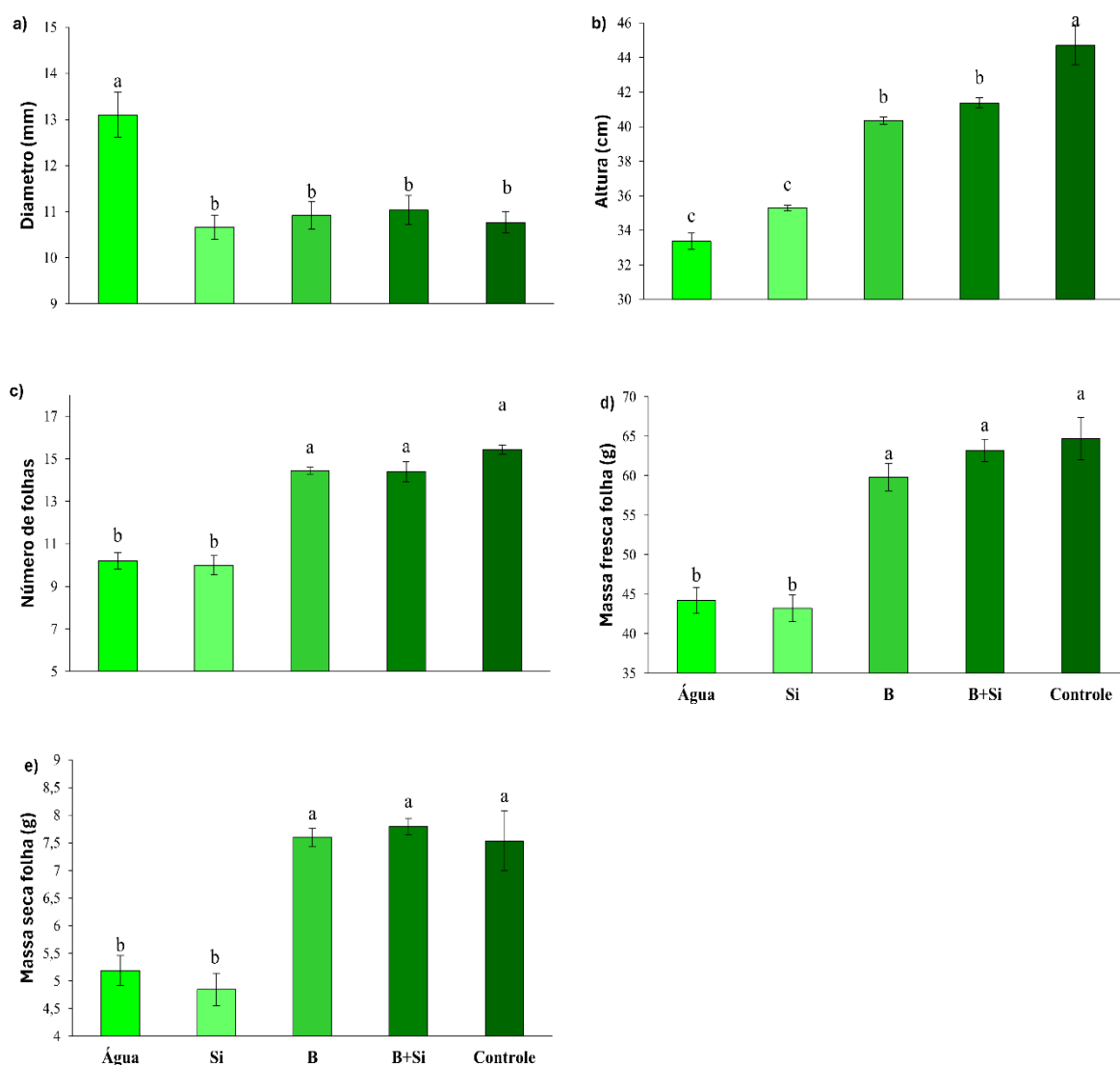


Figura 4. Diâmetro (a), altura da planta (b), número de folhas (c) massa foliar fresca (d), massa seca foliar (e), em plantas de brócolis cultivadas sob suficiência de B em solução nutritiva (controle) e deficiência de B em solução nutritiva com diferentes tratamentos foliares boro (B), silício (Si), boro + silício (B+Si) e somente água. Letras indicam diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos de acordo com o teste Tukey a 5% de probabilidade

A aplicação isolada de Si, quando comparada com o tratamento água, não apresentou diferença para o número de folhas (Figura 4c). No entanto, a aplicação isolada de B e associada de B+Si, resultaram em um aumento no número de folhas (Figura 4c) em comparação ao tratamento Si e água, sem apresentar diferença em comparação ao tratamento controle.

O emprego do tratamento controle e de B e de B+Si em relação aos demais tratamentos resultaram incremento na produção de massa fresca (Figura 4d) e seca (Figura 4f) de folhas. As plantas do tratamento controle, B e B+Si apresentaram as maiores massas de folha fresca e seca em comparação as plantas dos tratamentos água e Si (isolado) (Figura 4e, f). A aplicação isolada de Si, quando comparada com o tratamento água.

Foram observadas diferenças visuais no desenvolvimento de plantas de brócolis em resposta aos diferentes tratamentos aplicados (Figura 5a). O menor porte das plantas foi verificado no tratamento água e Si (Figura 5a), em comparação ao tratamento controle. Nos tratamentos com B isolado e B+Si associados, não foram observadas diferenças visuais entre os tratamentos. Entretanto, ambas apresentaram porte inferior quando comparados ao tratamento controle.

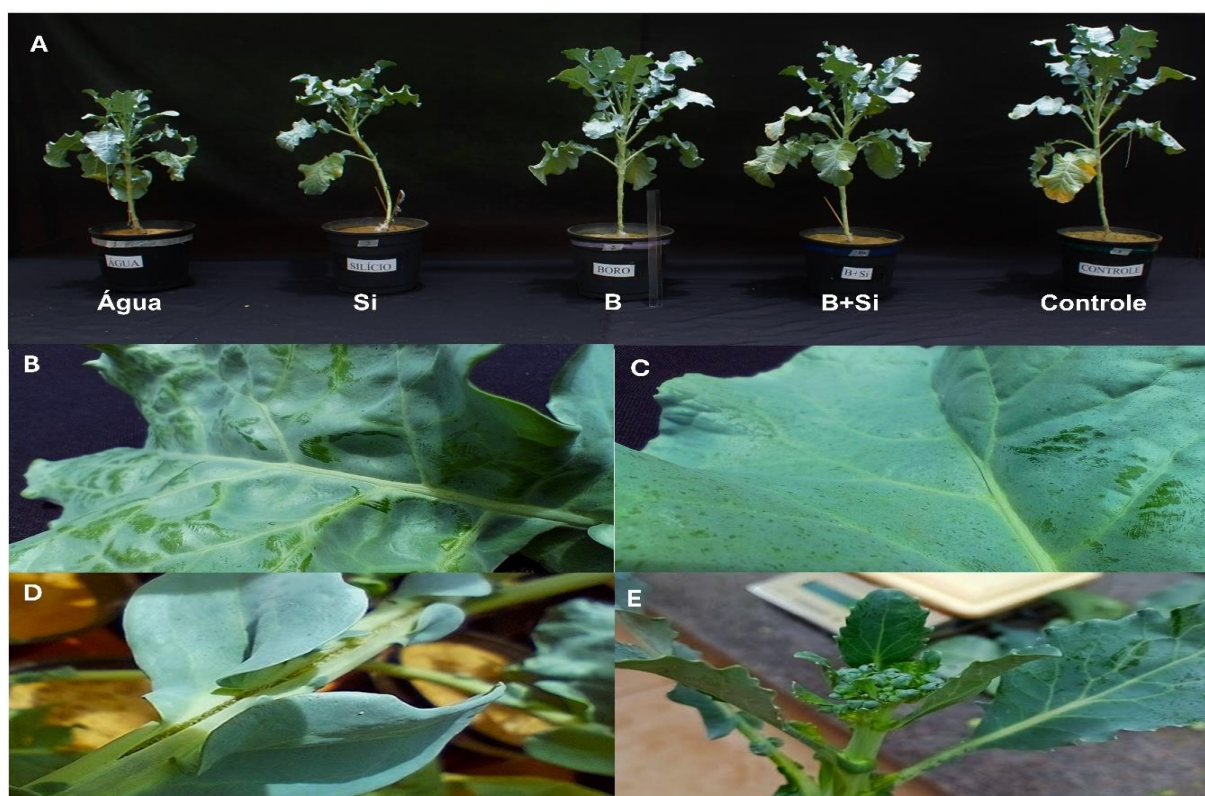


Figura 5. Plantas de brócolis aos 103 dias após o transplante cultivadas sob suficiência de B em solução nutritiva (controle) e deficiência de B em solução nutritiva com diferentes tratamentos aplicados via foliar boro (B), silício (Si), boro + silício (B+Si) e somente água (A), folhas de brócolis no tratamento água (B), folhas de brócolis no tratamento controle (C), pecíolo foliar no tratamento água (D), início da diferenciação floral no tratamento controle (E), em plantas de brócolis cultivadas sob deficiência de B (água) e suficiência de B em solução nutritiva (controle)

No tratamento água (Figura 5b), foram evidenciados sintomas visuais de deformação foliar, além de apresentar rachaduras no pecíolo (Figura 5d), em comparação com o tratamento controle (Figura 5b). O início da diferenciação floral foi observado exclusivamente no tratamento controle (Figura 5d) enquanto os demais tratamentos (água, Si, B e B+Si) promoveram apenas o desenvolvimento vegetativo, sem indução do estágio reprodutivo.

5. DISCUSSÃO

5.1. Importância do B fornecido via raiz a partir da solução nutritiva em plantas de brócolis

O melhor modo de fornecimento do B para a nutrição do brócolis foi via solução nutritiva, com concentração adequada do micronutriente, visto nas plantas do controle em relação aos diferentes tratamentos com pulverização foliar de B e de Si, isolados ou associados (Figura 1). Isso ocorre porque, no tratamento controle, o teor de B foliar atingiu 49 mg kg^{-1} , que está dentro da faixa de suficiência ($30 - 80 \text{ mg kg}^{-1}$) do micronutriente (Trani et al., 2022), enquanto as plantas dos demais tratamentos apresentaram média de 22 mg kg^{-1} de B.

O ótimo estado nutricional da planta em B, com o fornecimento de B via solução nutritiva em concentração adequada, se deve ao fato de a planta absorver o B e ser transportado via xilema até as folhas todos os dias de cultivo. Por outro lado, no fornecimento do B via pulverização foliar, o nutriente atinge as folhas de forma escalonada (Prado, 2021). Soma-se a isto o fato que o B tem baixa mobilidade no floema (Marschner, 2011), diminuindo sua redistribuição nas folhas que recebeu o B via foliar para as folhas mais novas, reduzindo seu efeito residual na planta, deixando as folhas novas com deficiências momentâneas até a próxima fertilização foliar.

O ótimo estado nutricional da planta com B no tratamento controle, em relação ao tratamento água, evitou a ocorrência de estresse. Isto ficou comprovado pela maior concentração de pigmentos fotossintéticos (Figura 3) no tratamento controle, em comparação ao tratamento água. Isto pode ser um indicativo de menor estresse

oxidativo, pois estes compostos não foram degradados e, se houvesse estresse oxidativo nas plantas, os pigmentos ficariam sujeitos a uma oxidação direta, resultando na degradação (Aguirre-joya et al., 2020) e na inibição da biossíntese (Aarti et al., 2006). Os benefícios do fornecimento de boro no conteúdo de pigmentos já foram relatados por outros autores (Mukhopadhyay et al., 2013; Lu et al., 2014; Taherian et al., 2019), pois, o micronutriente tem papel na melhoria da atividade da reação de Hill e no aumento da taxa fotossintética, conforme observado em estudo realizado com *Brassica campestris* L (Sharma e Ramchandra, 1990)

Os resultados do fornecimento adequado de B via radicular foram também evidenciados pelos sintomas de deficiência de B no tratamento com água, como a deformação das folhas (Figura 5b, c) e as rachaduras no pecíolo (Figura 6d), sintomas característicos da deficiência deste micronutriente (Prado, 2021). Devido à aplicação adequada de boro durante o ciclo da planta, o tratamento controle induziu início da indução floral (Figura 5e), o que não foi observado nos demais tratamentos

5.2. Nova estratégia para pulverização foliar de B associada ao Si em plantas de brócolis deficientes de B

O incremento das pesquisas com micronutrientes associados ao uso na agricultura nas últimas duas décadas, incluindo o B, tem potencializado a produtividade dos cultivos em diferentes regiões do mundo (Prado, 2021). O fornecimento deste nutriente tem predominado nos cultivos de brássicas na forma foliar, como complemento da fertilização via solo, mas muitas vezes este modo de aplicação tem sido utilizado como única opção de fertilização do cultivo.

O uso frequente da fertilização foliar boratada se deve ao fato que a quantidade exigida é relativamente baixa (gramas por hectare) tendo aplicação mais rápida do que no solo (Niu et al., 2021). Para esta prática, o B, normalmente, é adicionado junto com outros produtos durante a operação de manejo fitossanitário da cultura, que é feito via foliar (Prado, 2021). Neste cenário é importante que a pesquisa possa avançar no uso de estratégias para potencializar a resposta da planta, favorecendo melhor uso do B via foliar nesta espécie.

Para avançar neste tema, é importante que pesquisas sejam realizadas em plantas com deficiência de B. Nesta pesquisa, foi constatado que as plantas cultivadas com solução nutritiva com baixa concentração de B ($4,6 \mu\text{mol L}^{-1}$) apresentam teores foliares de B baixo, a exemplo do tratamento com pulverização foliar de água ($<20\text{mg kg}^{-1}$) bem inferior ao teor do micronutriente considerado adequado ($30\text{-}80 \text{mg kg}^{-1}$) para cultivos em campo (Trani et al., 2022).

A deficiência de B está relacionada com aumento no estresse oxidativo nas folhas (Souza Júnior et al., 2022b). O estresse oxidativo ocorre quando há um desequilíbrio entre a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e o sistema antioxidante de defesa (enzimático e não enzimático), resultando danos oxidativos (Kim et al., 2017; Fryzova et al., 2018).

A aplicação isolada ou associada de B ou Si mantiveram a concentração de pigmentos nas plantas deficientes em B (Figura 3). Este efeito pode ser devido a manutenção do conteúdo de pigmentos induzido pelo Si (Verma et al., 2020). Isto se deve pois o fornecimento de Si promove o aumento da assimilação de N e da produção de clorofila (Gou et al., 2020). Em adição o Si reduz o dano oxidativo, a degradação de moléculas que compõem pigmentos e proteínas, e reduz o dano à clorofila e ao transporte de elétrons no PSII, aumentando assim a resposta fotossintética (Oliveira et al., 2020). A clorofila é essencial para a fotossíntese, captura, distribuição e transformação da luz e sua manutenção, pela aplicação de Si, pode contribuir para o aumento da fotossíntese (Caddell et al., 2023). A importância do B no aumento do conteúdo destes pigmentos foi atribuída ao efeito deste micronutriente no metabolismo do nitrogênio, pois a sua falta diminui a atividade da nitrogenase e causa danos no estabelecimento da camada glicolipídica interna do envelope heterocisto celular (Brown et al., 2002; Silva Matos et al., 2015; Shehzad et al., 2018).

Os tratamentos Si, B e B+Si proporcionaram os maiores teores de pigmentos fotossintetizantes, como os carotenoides (Figura 3c). Os carotenoides são compostos antioxidantes não enzimáticos importantes, pois têm a capacidade de neutralizar radicais livres, transferindo elétrons ou hidrogênio para essas espécies reativas (McElroy e Kopsell, 2009). Isso inibe a propagação de reações de oxidação

em cadeia e protege outras moléculas, como outros pigmentos, contra os danos oxidativos (McElroy e Kopsell, 2009).

Os tratamentos B de forma isolada ou associada ao Si (B+Si), ao modular mecanismos fisiológicos e nutricionais, resultou em melhor desenvolvimento das plantas de brócolis, visto pelo incremento da produção de biomassa fresca da folha (Figura 4d) e seca (Figura 4e). Os resultados obtidos fazem assimetria com estudos inovadores recentes realizados em outras espécies, que indicam um efeito somatório da aplicação de B e Si associados, fornecidos via foliar, sem que ocorra polimerização e obtiveram efeito sinérgico superior em relação a aplicação isolada de B para mitigar a deficiência de B (Silva et al., 2021; Souza Júnior, et al., 2022a).

Novos estudos necessitam ser desenvolvidos para avaliar os efeitos da co-aplicação de B e de Si em outras espécies vegetais e para investigar os mecanismos moleculares subjacentes aos efeitos sinérgicos destes elementos, com o objetivo de elucidar como esses elementos interagem com outros processos fisiológicos e a produção de metabólitos das plantas.

6. CONCLUSÃO

A deficiência de B prejudica o crescimento das plantas de brócolis e reduz a concentração de pigmentos fotossintéticos e a produção de massa fresca e seca pela cultura. A pulverização foliar de B e de B+Si é capaz de corrigir a deficiência de B ao aumentar teores de clorofila, carotenóides, feofitina e o crescimento das plantas de brócolis tendo resultados semelhantes ao fornecimento do B via raiz. Este estudo indica que a nutrição boratada para brócolis pode ser recomendada tanto via raiz ou foliar sem a necessidade de inclusão do Si na calda de pulverização.

7. REFERÊNCIAS

Aarti PD, Tanaka R, Tanaka A (2006) Effects of oxidative stress on chlorophyll biosynthesis in cucumber (*Cucumis sativus*) cotyledons. **Physiologia Plantarum** 128:186–197.

Aguirre-Joya JÁ, Chacón-Garza LE, Valdivia-Najár G, Arredondo-Valdés R, Castro-López C, Ventura-Sobrevilla JM, Aguilar-González CN, Boone-Villa D (2020) Nanosystems of plant-based pigments and its relationship with oxidative stress. **Food and Chemical Toxicology** 143:111433

Bataglia O, Furlani A, Teixeira JP, Furlani P, Gallo J (1983) **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico 78:1–48.

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

Caddell D, Langenfeld NJ, Eckels MJH, Zhen S, Klaras R, Mishra L, Bugbee B and Coleman-Derr D (2023) Photosynthesis in rice is increased by CRISPR/Cas9-mediated transformation of two truncated light-harvesting antenna. **Frontiers in Plant Science** 14:1050483

Camacho-Cristóbal JJ, Rexach J, Herrera-Rodríguez MB, Navarro-Gochicoa MT, González-Fontes A (2011) Boron deficiency and transcript level changes. **Plant Science** 181:85-89.

Cardoso CP, Silva GN, Silva JLF, Prado, RM; Guedes VHF; Bortoli AS, De Júnior JPS (2022) Silicon and boron on cauliflower induce attractiveness and mortality in *Plutella xylostella*. **Pest Management Science** 78:5432–5436.

Choudhury FK, Rivero RM, Blumwald E, Mittler R (2017) Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. **Plant Journal** 90:856–867.

Deshmukh R, Sonah H, Belanger RR (2020) New evidence defining the evolutionary path of aquaporins regulating silicon uptake in land plants. **Oxford University Press** 71:6775-6788.

Dodd NA, Kudla J, Sanders D (2010) The language of calcium signaling: annual Review. **Plant Biology** 61:593–620.

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

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

FILGUEIRA FAR (3^o ed) (2012): novo manual de olericultura. UFV, 421p.

Fryzova R, Pohanka M, Martinkova P, Cihlarova H, Brtnicky M, Hladky J, Kynicky J (2018) Oxidative stress and heavy metals in plants. Em: *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (Eds. 245). **Springer: New York** p. 129–156.

Gou T, Yang L, Hu X, Chen X, Zhu Y, Guo J Gong H (2020) Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. **Plant Physiology and Biochemistry** 152:53-61

Guntzer F, Keller C, Meunier JR, (2012) Benefits of silicon for crops: a review. **Agronomy for Sustainable Development** 32:201-213.

Heiner EG, Qin Yu, Ruth W, Margot S, Monika W; Findekle P, Baluka F (2001) Rapid response reactions of roots to boron deprivation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 164:173–181.

Hoagland DR, Arnon DI (1950) **The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil**. California Agricultural experiment Station, Circular 247, 32p.

Jehangir IA, Wani SH, Bhat MA, Hussain A, Raja, W, Haribhushan A (2017) Micronutrients for crop production: role of boron. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences** 6:5347–5353.

Khan I, Awan AS, Rizwan M, Ali S, Hassan MJ, Brestic M, Zhang X, Huang L (2023) Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 222:112510.

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** 8:510

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

Loconsole D, Santamaria P (2021) UV lighting in horticulture: a sustainable tool for improving production quality and food safety. **Horticulturae** 7:1-13.

Lu YB, Yang LT, Li Y, Xu J, Liao TT, Chen YB, Chen LS (2014) Effects of boron deficiency on major metabolites, key enzymes and gas exchange in leaves and roots of *Citrus sinensis* seedlings. **Tree Physiology** 34: 608–618.

Ma JF, Yamaji N (2015). A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science** 20:435-442.

Ma JF, Tamai, K, Yamaji N, Mitani N, Konishi S, Katsuhara M, Yano M (2001) A silicon transporter in rice. **Nature** 409:789-791.

Malavolta E (1980) Elementos de Nutrição Mineral de Plantas. Em: **Macro e Micronutrientes**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres. p. 108–114.

Marschner P (2011) **Marschner's Mineral nutrition of higher plants** (3^o Ed). Elsevier. 649p.

Matos RRSS, Júnior GBS, Marques AS, Monteiro ML, Cavalcante ÍHL (2015) Osajima, J. A. Nutrient Concentrations and Leaf Chlorophyll of Yellow Passion Fruit Seedlings as a Function of Substrate Composition and Boron. **Journal of Plant Nutrition** 38:1984–1994

Mcelroy JS, Kopsell DA (2009) Physiological role of carotenoids and other antioxidants in plants and application to turfgrass stress management. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science** 37:327–333.

Mukhopadhyay M, Ghosh PD, Mondal TK (2013) Effect of boron deficiency on photosynthesis and antioxidant responses of young tea plantlets. **Russian Journal of Plant Physiology** 60:633–639.

Niaz A, Hannan A, Waqas M (2007) Boron status of soils as affected by different soil characteristics-ph, CaCO_3 , organic matter and clay contents. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences** 44:428-435.

Niu J, Liu C, Liu K, Huang, M, Yan D (2021) Effects of foliar fertilization: a review of current status and future perspectives. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21: 104-118.

Oliveira KR, Souza Junior JP, Bennett SJ, Checchio MV, Alves RC, Felisberto G, Prado RM, Gratão PL (2020) Exogenous silicon and salicylic acid applications improve tolerance to boron toxicity in field pea cultivars by intensifying antioxidant defence systems. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 201:110778.

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.

Prado RM (1^o Ed) (2021) **Mineral nutrition of tropical plants**. Springer Cham, 339p

Prado RM (2023) **Benefits of silicon in the nutrition of plants**. Springer, Cham. 381p.

Rabeh AH, El-motaium RA, Badawy SH (2023) Nano-silicon and boron foliar applications for promoting growth, yield, and fiber quality of Egyptian cotton (*Gossypium barbadense* L.). **Journal of Plant Nutrition** 46:3617-3632.

Ranjan A, Sinha R, Bala M, Pareek A, Singla-Pareek SI, Singh AK (2021) Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. **Plant Physiology and Biochemistry** 163:15-25

Ruiz JM, Bretones G, Baghour M, Ragala L, Belakbir A, Romero L (1998) Relationship between boron and phenolic metabolism in tobacco leaves. **Phytochemistry**. 48:269-272

Sharma PN, Ramchandra TV (1990) Water relations and photosynthesis in mustard plants subjected to boron deficiency. **Indian Journal of Plant Physiology** 33:150–154.

Shehzad MA, Maqsood M, Nawaz F, Abbas T, Yasin S (2018) Boron-induced improvement in physiological, biochemical and growth attributes in sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to terminal drought stress. **Journal of Plant Nutrition** 41:943–955.

Shorrocks VM (1997) The occurrence and correction of boron deficiency. **Plant and Soil** 193:121-148.

Silva JLF, Prado RM, Junior JPS, Tenesaca LFL, Silva DL, Pinsetta Junior JS (2021) Feasibility of silicon addition to boron foliar spraying in cauliflowers. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition** 21:2448–2455.

Souza Júnior JP, Prado RM, Campos CNS, Oliveira DF, Cazetta JO, Detoni JA (2022a) Silicon foliar spraying in the reproductive stage of cotton plays an equivalent role to boron in increasing yield, and combined boron-silicon application, without polymerization, increases fiber quality. **Industrial Crops and Products** v. 182:114888.

Souza Júnior JP, Prado RM, Campos CNS, Sousa Junior GS, Oliveira KR, Cazetta JO, Gratão PL (2022b) Addition of silicon to boron foliar spray in cotton plants modulates the antioxidative system attenuating boron deficiency and toxicity. **BMC Plant Biology** 22:1-13

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

Taherian M, Bostani A, Omid H (2019) Boron and pigment content in alfalfa affected by nano fertilization under calcareous conditions. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology** 53:136-143

Trani PE, Filho ABC, Camargo MS, Mello SC, Figueiredo GJB. Brócolis, Couve-Flor E Repolho. Em: Cantarella H. Quaggio JÁ, Mattos JD, Boaretto RM, Raij BV (2022) **Recomendações de Adubação e Calagem Para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 489p. (Boletim técnico, 100).

Uluisik I, Karakaya H C, Koc A (2018) The importance of boron in biological systems. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology** 45:156-162.

Verma KK, Liu XH, Wu KC, Singh RK, Song QQ, Malviya MK, Song XP, Singh P, Verma CL, Li YR (2020) The impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under different soil moisture levels. **Silicon** 12:1355–1367.

Zhou T, Hua Y, Xu F (2017) Involvement of reactive oxygen species and Ca²⁺ in the differential responses to low-boron in rapeseed genotypes. **Plant and Soil** 419:219–236.