

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

**APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLOGIA, NA PRODUÇÃO E  
NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA  
DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO  
GRANÍFERO**

**Raimundo Leonardo Lima de Oliveira  
Engenheiro Agrônomo**

**2017**

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

**APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLOGIA, NA PRODUÇÃO E  
NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA  
DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO  
GRANÍFERO**

**Raimundo Leonardo Lima de Oliveira**

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

**Coorientadora: Profa. Dra. Priscila Lupino Gratão**

**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).**

**2017**

O48a Oliveira, Raimundo Leonardo Lima de  
Aplicação de silício na fisiologia, na produção e na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em plantas de sorgo granífero / Raimundo Leonardo Lima de Oliveira. -- Jaboticabal, 2017  
iii, 44 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientadora: Priscila Lupino Gratão

Banca examinadora: Fábio César da Silva, Rogério Falleiros

Carvalho

Bibliografia

1. Elemento benéfico. 2. Estresse nutricional. 3. Fontes alternativas.  
4. *Sorghum bicolor* L. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.836:633.17

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



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLOGIA, NA PRODUÇÃO E NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO GRANÍFERO

**AUTOR: RAIMUNDO LEONARDO LIMA DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO**

**COORIENTADORA: PRISCILA LUPINO GRATÃO**

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

Pesquisador Dr. FÁBIO CÉSAR DA SILVA  
Centro Nacional de Pesquisas Tecnológica em Informática para a Agricultura / EMBRAPA / Campinas/SP

Prof. Dr. ROGERIO FALLEIROS CARVALHO  
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 21 de junho de 2017

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Raimundo Leonardo Lima de Oliveira nasceu em Capitão Poço – PA, Brasil em 07 de outubro de 1992, filho de Manoel Francisco de Lima e Maria Lídia de Oliveira Lima. Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, no Câmpus de Capitão Poço – CCP (2015). Durante a graduação, teve a oportunidade de ser bolsista de iniciação científica e de extensão, desenvolvendo trabalhos na área de produção vegetal e sendo membro do grupo de Estudos em Biodiversidade e Plantas Superiores – EBPS. Foi aluno do curso de mestrado do programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, sendo bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES. Fez parte do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas (GENPLANT), desenvolvendo pesquisas sobre nutrição silicatada em culturas anuais.

“O cientista não é o homem que fornece as verdadeiras respostas; é quem faz as verdadeiras perguntas”.

**Claude Lévi-Strauss**

Aos meus queridos pais Maria Lidia de Oliveira Lima e Manoel Francisco de Lima, pelos ensinamentos, dedicação, apoio e, principalmente, pelo exemplo de vida.

**Dedico e Ofereço**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e por sempre me iluminar na caminhada terrena.

À minha família, em especial meus pais, irmãos, avós e tios, por todo apoio, incentivo e compreensão para que pudesse alcançar meus objetivos. Meu muito Obrigado!.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade concedida para a realização do curso de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), por ter dado a oportunidade para realizar o curso, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida para a realização desta pesquisa.

Ao professor Dr. Renato de Mello Prado, pelos ensinamentos, dedicação, paciência e sabedoria. Meu muito Obrigado!.

À professora Dra. Priscila Lupino Gratão, pelos ensinamentos, dedicação e por ter aceitado coorientar-me para tornar este trabalho melhor possível. Meu muito Obrigado!.

Aos professores do curso de mestrado (Renato, Priscila, Arthur, José Carlos, Durvalina e Wadt), com quem tive a oportunidade de aprender um pouco mais durante as disciplinas cursadas. Meu muito Obrigado!.

À Claudinha, técnica do laboratório de Nutrição de Plantas e à Soninha, do laboratório de Fisiologia Vegetal, pelos ensinamentos e gentileza durante a realização das análises. Meu muito Obrigado!.

Ao grupo do GENPLANT, em especial a todos os seus membros com quem tive a oportunidade de conhecer (Guilherme, Gilmara, Thaís, Juliana, Rafael, Cibele, Edilaine, Luiz Cláudio, Cláudio, Cid, Leandro, Jonas, Marcilene, Flávio, Angélica, Rita), pelo compartilhamento de conhecimentos, fundamental para o crescimento profissional. Meu muito Obrigado!.

Ao Guilherme, pela amizade, companheirismo, sabedoria e dedicação durante esta jornada. Meu muito obrigado!.

A todas as pessoas que não foram citadas direta ou indiretamente, com quem tive a oportunidade de conhecer e conviver em determinados momentos em Jaboticabal SP. Meu muito Obrigado!.

## SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO</b> .....	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objetivo geral .....	3
1.2 Objetivos específicos .....	3
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>4</b>
2.1 A cultura do sorgo .....	4
2.2 Silício.....	5
2.3 Manganês.....	6
2.4 Silício na atenuação de estresse por deficiência nutricional .....	8
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>9</b>
3.1 Aplicação de fontes e concentrações de silício foliar em sorgo.....	10
3.1.1 Avaliações do experimento I .....	11
3.1.2 Análise estatística .....	13
3.2 Silício na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em sorgo.....	13
3.2.1 Avaliações do experimento II .....	14
3.2.2 Análise estatística.....	16
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	Erro! Indicador não definido.
4.1 Aplicação de fontes e concentrações de silício foliar em sorgo. ....	17
4.2 Silício na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em sorgo.....	27
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>35</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>

## RESUMO

### APLICAÇÃO DE SILÍCIO NA FISIOLOGIA, NA PRODUÇÃO E NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE CAUSADO PELA DEFICIÊNCIA DE MANGANÊS EM PLANTAS DE SORGO GRANÍFERO

**RESUMO** - O silicato de potássio é a fonte de silício (Si) mais empregada na aplicação foliar, havendo a necessidade de estudar fontes alternativas, e o papel que esse elemento benéfico pode ter na atenuação de estresses causados pela deficiência nutricional em plantas. O presente trabalho teve por objetivo avaliar a aplicação de fontes e concentrações de Si foliar, e com a fonte e a concentração escolhida, estudar a atuação do Si na mitigação de estresse por deficiência de manganês em sorgo granífero. Realizaram-se dois experimentos em cultivo hidropônico o experimento I, com aplicação de fontes e concentrações de Si em esquema fatorial 4x4, e no experimento II, a aplicação da fonte e concentração de Si escolhida, em esquema fatorial 3x2, ambos em blocos casualizados com três repetições. Ao final do experimento I, foram realizadas avaliações de crescimento, variáveis fisiológicas, acúmulo de Si na parte aérea e produção de grãos, e no experimento II, foram realizadas avaliações de crescimento, concentrações de malondialdeído, peróxido de hidrogênio, fotossíntese, acúmulo de Si, manganês e eficiência de uso do manganês na parte aérea. A aplicação foliar de fontes alternativas de Si incrementou o acúmulo de Si, refletindo nas trocas gasosas e na produção de grãos das plantas de sorgo. O maior acúmulo de Si, fornecido na forma radicular, mitiga o estresse por deficiência de manganês, devido à diminuição da peroxidação lipídica, favorecendo a fotossíntese e incrementando a matéria seca das plantas. A aplicação foliar das fontes nanossilica, silicato de sódio e potássio estabilizado, e o silicato de potássio na concentração 1,0 g L<sup>-1</sup> de Si é mais indicada, por proporcionar os maiores acúmulos de Si, com incrementos na fisiologia e na produção de grãos, e a aplicação do Si na forma radicular foi mais efetiva que a via foliar na mitigação do estresse por deficiência de manganês, evidenciada pela maior atividade fotossintética, eficiência de uso do manganês e a matéria seca das plantas.

**Palavras-chave:** elemento benéfico, estresse nutricional, fontes alternativas, *Sorghum bicolor* L.

## ABSTRACT

### SILICON APPLICATION IN PHYSIOLOGY, PRODUCTION AND MITIGATION OF STRESS CAUSED BY THE DEFICIENCY OF MANGANESE IN GRANIFERO SORGHUM PLANT

**ABSTRACT** - Potassium silicate is the source of silicon (Si) most used in foliar application, there being a need to study alternative sources, and the role that this beneficial element can play in the attenuation of stress caused by nutritional deficiency in plants. The objective of the present work was to evaluate the application of sources and concentrations of foliar Si, and with the source and concentration chosen, study the performance of Si in the mitigation of stress by manganese deficiency in grain sorghum. Two experiments were carried out in hydroponic cultivation, experiment I, with application of Si sources and concentrations in a 4x4 factorial scheme, and in experiment II, the application of the source and selected Si concentration, in a 3x2 factorial scheme, both in randomized blocks with three replicates. At the end of experiment I, were realized growth evaluations, physiological variables, Si accumulation in aerial part and grain production were performed, and in experiment II, were realized growth evaluations, concentrations of malondialdehyde, hydrogen peroxide, photosynthesis, Si accumulation, manganese and efficiency of manganese in aerial part. Foliar application of alternative sources of Si increased the accumulation of Si, reflecting the gas exchange and grain yield of sorghum plants. The greater accumulation of Si, provided in the form root, mitigate stress manganese deficiency, due to the decrease of lipid peroxidation, favoring photosynthesis and increasing the dry matter of the plants. Foliar application from sources nanosilica, stabilized sodium and potassium silicate, and potassium silicate at the concentration  $1,0 \text{ g L}^{-1}$  of Si is more indicated per providing the largest accumulations of Si with increases in physiology and in the production of grains, and the application of Si in the root form was more effective than the foliar route in the mitigation of stress per manganese deficiency, evidenced by the greater photosynthetic activity, manganese use efficiency and the dry matter of the plants.

**Keywords:** beneficial element, nutritional stress, alternative sources, *Sorghum bicolor* L.

## 1 INTRODUÇÃO

O silício é comumente encontrado em tecidos vegetais, considerado um elemento benéfico às plantas. O silício é absorvido na forma de ácido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), podendo ser ativa ou passivamente (LIANG et al., 2006; HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014). Esse elemento pode contribuir para a melhoria da capacidade produtiva dos cultivos, amenizando diferentes estresses, seja abiótico, seja biótico (CHEN et al., 2011; ENDRES; MARAFON, 2013), especialmente em espécies acumuladoras como o sorgo.

O conhecimento da fonte de silício adequada para a nutrição foliar do sorgo é importante, para avançar nos estudos enfocando os benefícios do elemento benéfico na mitigação de estresses, especialmente abióticos, que apresentam importância agrônômica. Portanto, um grande problema na agricultura tropical é a deficiência de manganês, dado o baixo teor do elemento nos solos, devido ao alto valor do pH, dado a práticas agrícolas inadequadas, causadas pelo excesso de calcário na camada superficial do solo (PRADO, 2008).

Atualmente, um dos grandes desafios da adubação silicatada é a utilização de fontes que possam ser mais eficientes no fornecimento de ácido monossilícico, atendendo às necessidades da planta, especialmente a via foliar, que exige fontes altamente solúveis e estáveis. A fonte de silício mais estudada para nutrição silicatada nas diversas culturas é o silicato de potássio, com pH próximo a 11, mas por não ser uma fonte estabilizada, para prevenir a polimerização do ácido silícico, torna-se assim, necessário conhecer fontes alternativas e estabilizadas que possam ter maior eficiência agrônômica no fornecimento de silício, ampliando os benefícios do elemento benéfico na agricultura.

Entre as fontes alternativas inovadoras para o fornecimento de silício para as plantas, destaca-se a fonte denominada de ácido silícico estabilizado, com pH menor que 3,0, pois quando diluída em água, estaria na forma prontamente para ser absorvida pela planta, favorecendo a absorção, além de não ter a necessidade de utilizar altas concentrações de silício. Em estudos com a fonte ácido silícico estabilizado, conduzidos por Soratto et al. (2012), eles observaram que a aplicação

foliar de silício incrementou em 26% a produção de grãos de trigo, em comparação com o tratamento controle. O silicato de sódio e de potássio, estabilizado com pH próximo a 11, é outra fonte inovadora e intermediária de fornecimento de silício às plantas. Essa fonte de silício está sendo desenvolvida na UNESP, e ainda não existem relatos do efeito agrônômico desta fonte, nas culturas agrícolas.

Com o advento da nanotecnologia e o surgimento dos nanomateriais, a nanossílica passou a ser uma fonte alternativa e inovadora para o fornecimento de silício às plantas. Trata-se de um dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) nanoparticulado, que devido ao tamanho reduzido de 4,0 nm, pode ser absorvido, proporcionando benefícios na fisiologia e na produção das plantas (YUVAKKUMAR et al., 2011; SURIYAPRABHA et al., 2013). Estudos indicaram que a aplicação de doses de nanossílica em solo pôde proporcionar melhor crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, além de aumentar as trocas gasosas, a condutância estomática e a taxa líquida de fotossíntese (XIE et al., 2012).

A mitigação dos efeitos da deficiência de manganês em plantas pelo silício é pouco estudada na literatura, tampouco os mecanismos de mitigação. Portanto, ainda não existem relatos sobre os estudos envolvendo especificamente esse tema para a cultura do sorgo.

Sabe-se que a deficiência de manganês proporciona estresse oxidativo nas plantas, pelo aumento da concentração de peróxido de hidrogênio e malondialdeído, um indicador da peroxidação lipídica (ZHAO et al., 2014). Diante disso, o silício pode atuar no sistema antioxidante das plantas, aumentando a atividade de enzimas, como superóxido dismutase (SOD), que atuam eliminando o excesso de espécies reativas de oxigênio que se formam em condição estressante na planta (MIAO; HAN; ZANG, 2010).

As gramíneas, em especial o sorgo, pelo fato de serem acumuladoras de silício, apresentam alta habilidade na absorção do elemento benéfico via radicular, o que, possivelmente pode apresentar maior efeito do silício na mitigação de estresse por deficiência nutricional em plantas, como observado nos estudos realizados por Pavlovic et al. (2013), em pepino, com a omissão do elemento ferro.

Diante do exposto, é pertinente testar as hipóteses: A aplicação foliar com fontes alternativas e concentrações de silício, comparada ao silicato de potássio,

pode promover incrementos na absorção do elemento, com reflexos na fisiologia e na produção. A aplicação de silício em plantas de sorgo, cultivadas na ausência de manganês, mitiga o estresse promovido pela deficiência do nutriente, e a aplicação via radicular pode ser mais efetiva na mitigação do estresse que a via foliar.

### **1.1 Objetivo geral**

Avaliar a aplicação de fontes e de concentrações de silício foliar, e o efeito do elemento benéfico, na capacidade de mitigar estresse por deficiência de manganês em plantas de sorgo granífero.

### **1.2 Objetivos específicos**

- I. Comparar fontes solúveis e nanoparticuladas de silício foliar no crescimento, na fisiologia e na produção das plantas de sorgo.
  
- II. Avaliar a capacidade do silício como elemento benéfico em mitigar o estresse causado pela deficiência de manganês, e se a aplicação via radicular é mais efetiva que a forma foliar na atenuação de estresse por deficiência nutricional em plantas de sorgo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A cultura do sorgo

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é considerado o quinto cereal mais cultivado no mundo, depois do trigo, arroz, milho e cevada, sendo que 90% da área plantada estão localizados nos países em desenvolvimento, com utilização principalmente na produção de rações para a alimentação animal (FAO, 2017). Na região Sudeste o estado de São Paulo ocupa a segunda posição depois de Minas Gerais, com produção de 71.360 toneladas na safra de 2015 (IBGE, 2017).

O sorgo pertence à família gramínea e tem origem africana, e estima-se que foi domesticado entre três mil e cinco mil anos atrás. É uma cultura de extrema importância para os povos da Ásia e África, pois é utilizado diretamente na alimentação humana. A cultura adapta-se muito bem a regiões de altas temperaturas e baixa precipitação, podendo ser cultivado, por exemplo, em regiões semiáridas. O ciclo fenológico pode ser dividido em três fases: a vegetativa (EC1), o florescimento, que corresponde ao desenvolvimento da inflorescência (EC2), e por último as fases de maturação fisiológica dos grãos e da senescência da planta (EC3) (FRANCO, 2011).

No cerrado brasileiro, o sorgo assume destaque em substituição ao milho, como suplemento energético, pois consiste em uma das culturas alimentares mais versáteis do ponto de vista fotossintético e de maturação. Nesse sentido, é necessário difundi-la e incentivá-la, sobretudo através do incremento em sua produtividade, que depende, dentre outros fatores, da nutrição mineral (FONSECA et al., 2008).

Nos países ocidentais como os Estados Unidos e o Brasil, o sorgo ainda é destinado principalmente à alimentação animal por isso, a fim de melhorar a produtividade, a qualidade de grãos e a rentabilidade dessa cultura, as instituições públicas vêm-se esforçando a desenvolver cultivares com potencial genético produtivo, tanto para o sorgo granífero, o forrageiro, quanto para o sacarino, assim

como ampliar os estudos que adubação foliar com silício, poderá proporcionar em incrementos na produção (FILHO; RODRIGUES, 2015).

Na literatura, são escassas as informações quanto à nutrição silicatada foliar na cultura do sorgo e seus efeitos na nutrição, no crescimento, na fisiologia e na produção da planta. Em estudos recentes, Oliveira e Canuto et al. (2016) observaram que a aplicação de silício em solo, em sorgo granífero, proporcionou aumento linear do teor desse elemento na parte aérea da planta, contribuindo para que a ela pudesse vir a ter maior tolerância a estresses. Também em estudos mais recentes com sorgo cultivado em meio deficiente de potássio, o silício aliviou a deficiência do macronutriente, mantendo o potencial hídrico na planta e evitando a desidratação da cultura (CHEN et al., 2016).

Em estudos mais anteriores, realizados por Ahmed et al. (2014), a nutrição com o silício teve efeito significativo sobre o crescimento e os parâmetros fisiológicos do sorgo, em comparação com os tratamentos sem silício. O potencial hídrico foliar foi maior, assim como o índice de SPAD, mostrando que o silício pode ser usado como elemento potencial para o ideal desenvolvimento dessas plantas.

## 2.2 Silício

O silício é o segundo elemento de maior abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio. É absorvido pelas plantas na forma de  $H_4SiO_4$  (ácido monossilícico) originário a partir de intensos processos de intemperização dos minerais, como os agrilossilicatos (KORNDÖRFER, 2017).

As plantas que absorvem silício podem ser classificadas em acumuladoras, como o arroz, sorgo e milho, pois em geral possuem teor foliar acima de 1%, e não acumuladoras, a exemplo do feijão e da soja, plantas com teor de silício menor que 0,5% (MA et al., 2001).

Aubos contendo silício são atualmente usados em vários países, e este elemento tem sido considerado chave para a sustentabilidade da agricultura (KORNDÖRFER, 2006). O silício pode ser encontrado principalmente em mineral

inerte das areias, quartzo ( $\text{SiO}_2$  puro), caulinita, micas, fedspato e em outros minerais de argilas silicatadas (SOUZA et al., 2010).

Segundo Figueiredo et al. (2010), a aplicação foliar de fontes de silício solúvel tem sido foco de várias pesquisas pela sua eficácia, pela praticidade, pelo uso de doses menores e também por ser adaptável aos pulverizadores normalmente utilizados por muitos produtores. Quando aplicado via radicular, após ser absorvido, o silício é transportado via xilema e segue o fluxo transpiracional, podendo acumular-se e formar dupla camada na epiderme foliar, aumentando a rigidez celular, além de promover maior interceptação de luz pelo dossel vegetativo, potencializando as características agrônômicas e podendo elevar a produtividade das culturas (CRUSCIOL et al., 2013).

O silício pode promover inúmeros benefícios para as plantas, proporcionando aumento de matéria seca (GOMES et al., 2011), sendo indutor de tolerância aos mais variados estresses, como déficit hídrico (ZANETTI, 2013), à toxicidade de alumínio (LIANG et al., 2001) e de manganês (LI et al., 2012).

Na literatura, os estudos com silício e manganês concentram-se mais fornecendo informações do papel desse elemento benéfico, quando as plantas são cultivadas em condições de excesso de manganês. Maksimovic et al. (2012) observaram que, em plantas de pepinos expostas a excesso desse micronutriente, o silício teve papel fundamental, diminuindo significativamente o teor de peróxido de hidrogênio na planta e o teor do elemento livre no apoplasto celular, promovendo, assim, ausência dos sintomas de toxidez nas folhas. Em estudos mais anteriores com sorgo granífero, Galvez et al. (1989) puderam constatar o efeito do silício no alívio da toxidez, embora parcialmente, causado pelo manganês, quando aplicado em níveis extremamente elevados na planta.

### **2.3 Manganês**

O manganês é o segundo micronutriente mais abundante em solos tropicais, perdendo apenas para o ferro. É um elemento essencial às plantas, atuando em

diversos processos metabólicos, principalmente na fotossíntese e como cofator de enzimas antioxidantes (MILLALEO et al., 2010).

O manganês é absorvido ativamente pelas raízes e transportado pelo xilema na forma iônica  $Mn^{+2}$ . Sua disponibilidade no solo é afetada pela correção da acidez, tornando-o insolúvel com o aumento do pH (CUNHA, 2009). A alta concentração em solos ácidos pode causar problemas de toxidez nas plantas; entretanto, aqueles solos que receberam altas doses de corretivo para a acidez, podem vir a induzir uma diminuição na disponibilidade do micronutriente, podendo causar deficiências nas plantas (PRADO, 2008). É importante destacar que a deficiência de manganês, em muitas das situações, pode ocorrer sem sintomas visuais na planta, mascarando, assim, a distribuição e a dimensão do problema, podendo vir a restringir a produtividade das culturas (SCHMIDT; JENSEN; HUSTED, 2016).

A participação do manganês no metabolismo vegetal é bastante relatada na literatura, atuando principalmente na fotossíntese, pois esse micronutriente faz parte de um complexo enzimático que atua na quebra da molécula da água (reação de Hill), para que os elétrons sejam transferidos para o fotossistema II (GOUSSIAS; BOUSSAC; RUTHERFORD, 2002). Atua também como cofator de uma série de enzimas, como superóxido dismutase, catalase e piruvato carboxilase (DUCIC; POLE, 2005).

A deficiência promove clorose entre as nervuras nas folhas mais jovens, assim como menor crescimento, área foliar e diminuição da produção de matéria seca da planta (VELOSO et al., 1995), além de levar à diminuição da atividade fotossintética na planta, à redução no teor de clorofila e pode promover estresse oxidativo pelo aumento na concentração de malondialdeído, promovendo a peroxidação lipídica (SAIDI et al., 2012).

Sabe-se que plantas menos nutrida de manganês podem também apresentar um desenvolvimento tardio das anteras, afetando, assim, a produção e a taxa de germinação de sementes (SHARMA et al., 1991). Em deficiências mais severas, pode haver quebra na estrutura dos cloroplastos, podendo não ser revertida, e todos os processos fisiológicos relacionados ao transporte de elétrons são prejudicados na planta (KIRKBY; RÖMHELD, 2007). Diante disso, em estudos realizados por

Malavolta et al. (1977) em sorgo, eles concluíram que o excesso de manganês parece ser menos prejudicial que sua falta na planta.

Há diversos trabalhos na literatura relatando a atuação do silício na atenuação de estresses por toxidez de metais, nutrientes, deficiência hídrica e até mesmo estresses bióticos; entretanto, o papel desse elemento na atenuação de estresse por deficiência de manganês, em plantas de sorgo, não tem sido ainda abordado.

#### **2.4 Silício na atenuação de estresse por deficiência nutricional**

O silício tem sido amplamente relatado na literatura pelos efeitos benéficos às culturas, principalmente relacionados à mitigação de diferentes estresses, seja abiótico, seja biótico (MA et al., 2006). Em plantas de pepino, a aplicação de silício amenizou o estresse causado por toxicidade de manganês, promovendo, assim, aumentos na produção de biomassa (DRAGISIC MAKSIMOVIC et al., 2007).

A ação benéfica do silício tem sido associada a diversos efeitos indiretos, como o aumento da resistência mecânica das células, como indutor de tolerância das plantas a pragas e doenças, diminuindo o efeito tóxico do boro, manganês, ferro e metais pesados, aumentando a absorção e o metabolismo de elementos (LANA et al., 2003). O silício está também relacionado com o aumento do sistema de defesa antioxidante da planta, promovendo a redução do dano oxidativo de moléculas funcionais e de membranas, e a manutenção dos processos fisiológicos sob condições de estresse (GONG et al., 2005).

A aplicação de silício teve um papel fundamental no retardamento do aparecimento dos sintomas de clorose causados pela deficiência de ferro na soja, restringindo, assim, a diminuição dos parâmetros de crescimento (GONZALO; LUCENA; HERNÁNDEZ-APAOLAZA, 2013).

Pavlovic et al. (2013) constataram o potencial do silício em mitigar os efeitos da deficiência de ferro em pepino e atribuíram esse comportamento à capacidade do elemento benéfico em aumentar a disponibilidade de ferro no apoplasto das raízes,

e ao aumento da mobilização do micronutriente das raízes à parte aérea pela síntese de Fe-fitoquelatinas.

Estudos conduzidos por Bityutskii et al. (2014) em plantas de pepino observaram que a aplicação de silício impediu os sintomas de deficiência de zinco e manganês, caracterizados por manchas necróticas, provavelmente ao efeito indireto em aumentar a capacidade de defesa antioxidante nos tecidos vegetais. Esses mesmos autores observaram que, nas plantas deficientes em ferro, o principal efeito proporcionado pelo silício foi o aumento da distribuição desse elemento para as partes apicais do ramo, devido ao acúmulo de compostos mobilizadores de ferro, como citrato (nas folhas e raízes) ou catequina (nas raízes), induzido pelo silício.

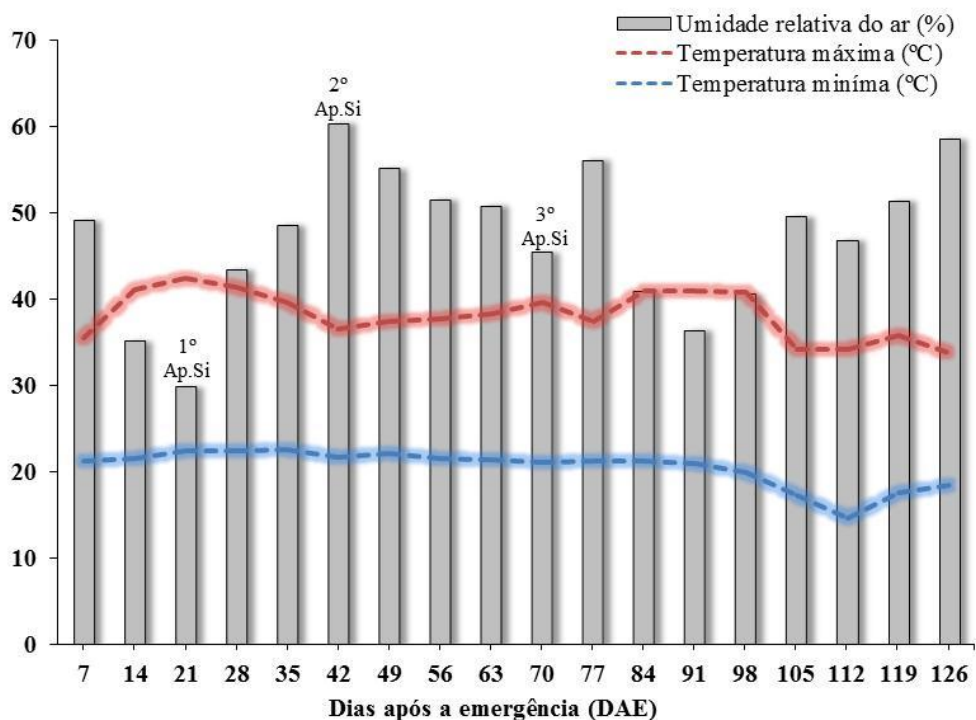
Em plantas quando submetidas à deficiência nutricional, o silício tem proporcionado atenuação na diminuição da matéria seca na planta, assim como, as taxas de fotossíntese, transpiração e condutância estomática são melhoradas pelo fornecimento do elemento benéfico, além de também amenizar a redução dos pigmentos clorofilianos e carotenoides, e evitar maior degradação de um complexo de proteínas que formam as membranas tilacoidais (MUNEER; JEONG, 2015).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi desenvolvido em casa de vegetação, no Departamento de Solos e Adubos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal-SP, localizada na altitude de 610 metros, com as coordenadas geográficas (21°15'22"S e 48°18'58"W), por meio de sistema hidropônico de cultivo, a partir de dois experimentos, sendo o experimento I, com aplicação de fontes e concentrações de silício foliar em sorgo, e o experimento II, silício na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em plantas de sorgo.

### 3.1 Aplicação de fontes e concentrações de silício foliar em sorgo

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, em sistema hidropônico de cultivo, no período de 15 de janeiro a 19 de maio de 2016. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com três repetições. Durante a condução do experimento, realizou-se a coleta diária dos dados de temperatura mínima, máxima e umidade relativa do ar (Figura 1).



**Figura 1.** Temperatura mínima, máxima e umidade relativa do ar média, no interior da casa de vegetação, durante a condução do experimento, indicando as épocas das aplicações de silício, aos 21; 42 e 70 dias após a emergência.

Os tratamentos consistiram em um esquema fatorial 4x4, disposto em blocos casualizados, com três repetições. Utilizaram-se quatro fontes de Si: silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaKE) ( $114,91 \text{ g L}^{-1}$  de Si,  $18,9 \text{ g L}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  e valor pH 11); nanossílica (Nano) Bindzil® 15/750 AkzoNobel® ( $77,12 \text{ g L}^{-1}$  de Si,  $750 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  de área específica,  $1,1 \text{ g L}^{-1}$  de densidade, valor pH 10,5 e 4 nm de tamanho médio de partículas); ácido silícico estabilizado (ASiE) ( $14,04 \text{ g L}^{-1}$  de Si e valor pH 2) e o

silicato de potássio (SiK) Diatom<sup>®</sup> (128,00 g L<sup>-1</sup> de Si, 126 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e valor pH 11); e quatro concentrações: 0; 0,5; 1,0 e 1,5 g L<sup>-1</sup> de Si, aplicado via foliar com uma vasão de 1,6 mL por vaso com pulverizador manual para cada fonte estudada.

Foram semeadas 12 sementes de sorgo da cultivar Dekalb 540, em vasos plásticos com volume de 7,0 dm<sup>3</sup> preenchidos com vermiculita de granulometria fina no dia 15 de janeiro de 2016. No dia 19 de janeiro, quatro dias após a semeadura, ocorreu a emergência das plantas. Aos doze dias após a emergência (DAE), foi realizado o desbaste, em que cada unidade experimental passou a constar de três mudas cultivadas em vaso de polipropileno. Até o início da aplicação da solução nutritiva, as plantas foram irrigadas manualmente com água destilada.

Aos sete dias (DAE), iniciou-se aplicação da solução nutritiva com força iônica de 25%, até alcançar 100% da força iônica com trinta e três dias (DAE). A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950), com modificação na fonte de ferro Fe-EDTA para Fe-EDDHMA, mantendo valor pH da solução nutritiva de  $5,5 \pm 0,5$ . As correções do valor pH da solução nutritiva eram realizadas com solução de HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) ou NaOH (1,0 mol L<sup>-1</sup>).

As aplicações foliares de silício foram realizadas em três momentos dos estádios fenológicos de desenvolvimento das plantas de sorgo V4 e V8: (quando as mesmas apresentavam quatro e oito folhas totalmente expandidas respectivamente), e a última aplicação no início do florescimento (R1).

Durante as aplicações, a vermiculita foi coberta com algodão para que não ocorresse a deposição de calda nesta e, conseqüentemente absorção radicular pelas plantas. A calda foi preparada utilizando-se de água deionizada, e após a adição das respectivas fontes e concentrações de silício, o pH foi corrigido para 5,5, com HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) ou NaOH (1,0 mol L<sup>-1</sup>).

### **3.1.1 Avaliações do experimento I**

Após a aplicação dos tratamentos, foram realizadas as seguintes avaliações:

**Área foliar (cm<sup>2</sup>):** Foi realizada medindo-se o comprimento e a máxima largura do limbo foliar de todas as folhas, com auxílio de uma régua milimetrada e um fator de ajuste. Para a cultura do sorgo, o fator utilizado foi de 0,75, conforme descrito por Stickler et al. (1961).

**Massa seca da parte aérea (g por planta):** Coletou-se a parte aérea das plantas (colmo+folhas) que foram lavadas com solução de detergente e água deionizada, a fim de eliminar qualquer indício de contaminação da superfície foliar. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar entre 65 a 70 °C até atingir massa constante. Depois, as amostras foram pesadas em balanças de precisão de 0,002 g, para a determinação da massa seca.

**Acúmulo de silício na parte aérea (mg por planta):** Após pesadas, as amostras da parte aérea do sorgo foram moídas em moinhos do tipo Wiley, para a determinação do teor de silício, de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer, Pereira e Nolla (2004). Em seguida foram determinados o acúmulo de silício, resultado do produto da massa seca, e o teor do elemento.

**Microscopia eletrônica de varredura:** Foram coletadas partes de lâminas foliares de aproximadamente 5 mm da quarta folha das plantas que receberam aplicação das fontes na maior concentração de silício aplicado via foliar e o tratamento controle (concentração 0). Essas folhas foram cortadas em duas partes centrais e fixadas com glutaraldeído a 3%, por 48 h. Após esse tempo, foram desidratadas em séries crescentes de etanol absoluto (30; 50; 70; 80; 90 e 100%), com intervalos de 20 minutos. Em seguida, foram secas em secador de ponto crítico em CO<sub>2</sub> (modelo EMS<sup>®</sup>-850). Posteriormente, as amostras foram montadas em stabeers com superfície adaxial voltada para cima e passadas no metalizador DENTON VACUUM<sup>®</sup>, por 120 segundos (HAN et al., 2016). Para detecção da presença de silício, foram feitas eletromicrografias no microscópio eletrônico de varredura modelo JSM5410–JEOL<sup>®</sup>. Todas as eletromicrografias foram executadas em uma ampliação de 500x.

**Determinação dos índices fisiológicos:** Foram realizadas avaliações de fotossíntese ( $\text{mmol CO}_2 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ), condutância estomática ( $\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e transpiração ( $\text{mmol H}_2\text{O s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ). Essas variáveis foram medidas na quarta folha por meio do aparelho IRGA (Analisador de gás infravermelho, modelo LI- 6400XT, LI-COR®, Lincoln, NE, EUA). As medições foram realizadas no período entre as 7h 30 e 9h 30 da manhã.

**Produção de grãos (g por planta):** No final do experimento, foram coletadas as panículas de sorgo e postas para secar em estufa com circulação forçada de ar entre 65 a 70 °C, e depois realizada a debulha dos grãos de cada panícula, manualmente, para a determinação da variável produção, proveniente de cada vaso e corrigindo-se o teor de água para  $130 \text{ g kg}^{-1}$  (BRASIL, 2009).

### 3.1.2 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, utilizando-se do teste F, a 5 % de probabilidade. Quando significativo, as fontes de silício foram submetidas ao teste de Tukey, e as concentrações de silício foram submetidas à análise de regressão polinomial, ambas a 5% de probabilidade. Para proceder aos cálculos estatísticos, foi utilizado o software SISVAR, versão 5.6 (FERREIRA, 2014).

## 3.2 Silício na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em sorgo

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação, em sistema hidropônico de cultivo, no período de 1º de agosto a 10 de dezembro de 2016. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados. Os tratamentos consistiram em um esquema fatorial 3x2, sendo o primeiro fator caracterizado pelos tratamentos sem silício, silício foliar e silício radicular. O segundo fator foi caracterizado pela presença e omissão de manganês na solução nutritiva, com três repetições.

Foram semeadas 6,0 sementes de sorgo cultivar Dekalb 540, em vasos plásticos com volume de 7,0 dm<sup>3</sup>, preenchidos com vermiculita de granulometria média no dia 1º de agosto de 2016. No dia 07 de agosto, seis dias após a semeadura, ocorreu a emergência das plantas. Aos 21 dias (DAE), foi realizado o desbaste, e cada unidade experimental passou a constar de três mudas cultivadas em vaso de polipropileno. Até o início da aplicação da solução nutritiva, as plantas foram irrigadas manualmente com água deionizada.

Aos oito dias (DAE), iniciou-se a aplicação da solução nutritiva com força iônica de 25%, até alcançar 100% da força iônica com quarenta e três dias (DAE). A solução nutritiva utilizada foi a de Hoagland e Arnon (1950), com modificação na fonte de ferro Fe-EDTA para Fe-EDDHMA, mantendo-se o valor pH da solução nutritiva de  $5,5 \pm 0,5$ . As correções do valor pH da solução nutritiva eram realizadas com solução de HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) ou NaOH (1,0 mol L<sup>-1</sup>).

Nos tratamentos que receberam aplicação de silício, foi utilizado um silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaKE) (113,40 g L<sup>-1</sup> de Si, 18,9 g L<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e valor pH 11), na concentração de 1,0 g L<sup>-1</sup>, aplicado via foliar, com uma vasão de 1,6 mL por vaso, em três estádios do desenvolvimento das plantas de sorgo V5 e V9 (quando as mesmas estavam com cinco e nove folhas completamente expandidas, respectivamente), e a última aplicação, no início do florescimento (R1).

Durante as aplicações, o substrato foi coberto com algodão para que não ocorresse a deposição de calda neste e, conseqüentemente, absorção radicular pelas plantas. A calda foi preparada utilizando-se de água deionizada, e após a adição da respectiva fonte e concentração de silício, o pH foi corrigido para 5,5, com HCl (1,0 mol L<sup>-1</sup>) ou NaOH (1,0 mol L<sup>-1</sup>). No tratamento radicular, o silício foi fornecido a uma concentração de 2,0 mmol L<sup>-1</sup> durante toda a condução do experimento.

### **3.2.1 Avaliações do experimento II**

Após a aplicação dos tratamentos, foram realizadas as seguintes avaliações:

**Área foliar (cm<sup>2</sup>):** Foi realizada medindo-se o comprimento e a máxima largura do limbo foliar de todas as folhas, com auxílio de uma régua milimetrada e um fator de ajuste. Para a cultura do sorgo, o fator utilizado foi de 0,75, conforme descrito por Stickler et al. (1961).

**Massa seca da parte aérea (g por planta):** Coletou-se a parte aérea das plantas (colmo+folhas), que foram lavadas com solução de detergente e água deionizada, a fim de eliminar qualquer indício de contaminação da superfície foliar. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em sacos de papel e levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar entre 65 a 70 °C até atingir massa constante. Depois, as amostras foram pesadas em balanças de precisão de 0,002 g, para a determinação da massa seca.

**Acúmulo de silício na parte aérea (mg por planta):** Após pesadas, as amostras da parte aérea do sorgo foram moídas em moinhos do tipo Wiley, para a determinação do teor de silício, de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer, Pereira e Nolla (2004). Em seguida, foi determinado o acúmulo de silício, resultado do produto da massa seca e o teor do elemento.

**Acúmulo de manganês na parte aérea (mg por planta):** Após pesadas, as amostras da parte aérea do sorgo foram moídas em moinhos do tipo Wiley, para a determinação do teor de manganês, de acordo com a metodologia descrita por Bataglia et al. (1983). Em seguida, foi determinado o acúmulo de manganês, resultado do produto da massa seca e o teor do elemento.

**Eficiência de uso do manganês (g<sup>2</sup>/mg):** Foi obtido a partir da matéria seca total produzida na planta, pelo conteúdo total do nutriente na planta, conforme Siddiqi e Glass (1981).

**Determinação da fotossíntese:** Foi realizada avaliação de fotossíntese na quarta folha, por meio do aparelho IRGA (Analisador de gás infravermelho, modelo LI-

6400XT, LI-COR®, Lincoln, NE, EUA). As medições foram realizadas no período entre as 8h 30 e 9h 30 da manhã.

**Peroxidação Lipídica – Malondialdeído (MDA):** A peroxidação lipídica foi medida pela estimativa do teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS), conforme descrito por Heath e Packer (1968). Foram pesados 200 mg do tecido vegetal, que foi triturado com polivinilpolipirrolidona a 20% (PVPP) e 0,1% de ácido tricloroacético (TCA). Após centrifugação a 11.000 x g durante 15 min, o sobrenadante foi adicionado a uma solução de 20% de TCA e 0,5% de ácido tiobarbitúrico (TBA) e incubado em banho-maria a 95 °C, durante 30 min. Após retirar do banho seco, o material foi colocado em gelo por 10 minutos e depois centrifugado por 5 minutos, a 11.000 x g.

A concentração de malondialdeído (MDA) foi determinada em espectrofotômetro com comprimento de onda de 535 e 600 nm. Os dados foram calculados utilizando um coeficiente de extinção de  $1.55 \times 10^{-5} \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$  (GRATÃO et al., 2012). Os resultados de MDA foram expressos em nMol/g de matéria fresca.

**Conteúdo de Peróxido de Hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>):** O teor de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi estimado seguindo o método de Alexieva et al. (2001). Foram pesados 200 mg do tecido vegetal, que foi homogeneizado em ácido tricloroacético (TCA) a 0,1% e centrifugados a 11.000 x g durante 15 min. O sobrenadante foi adicionado ao tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,50) e solução de iodeto de potássio 1,0 M. Depois, o material foi incubado em gelo durante uma hora, a absorbância foi lida a 390 nm, e o teor de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foi determinado utilizando uma curva de concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, conhecida como curva padrão. Os resultados de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> foram expressos em µMol/g de matéria fresca.

### 3.2.2 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste F, seguindo-se a aplicação do teste de Tukey, a 5% de probabilidade, para a

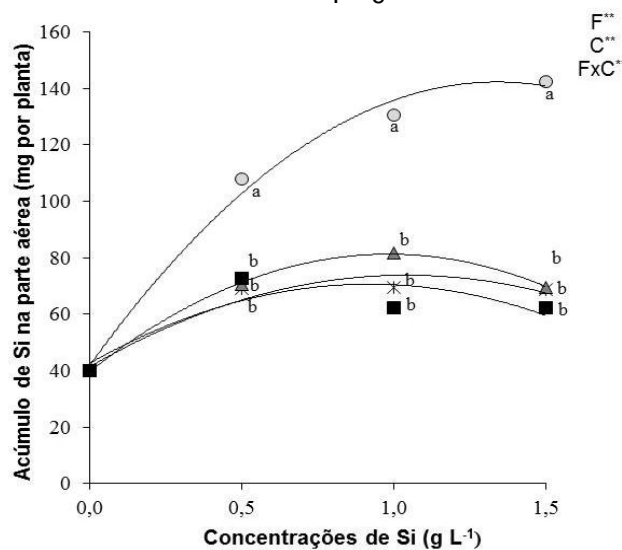
comparação das médias, utilizando o programa estatístico AgroEstat (BARBOSA; JÚNIOR, 2016).

## 4 RESULTA DOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Aplicação de fontes e concentrações de silício foliar em sorgo

Houve interação entre as fontes e concentrações de silício aplicado via foliar na parte aérea do sorgo no acúmulo de silício (Figura 2). A aplicação foliar de silício com a nanossílica (Nano) na concentração de 1,34 g L<sup>-1</sup> de Si, proporcionou maior acúmulo deste elemento benéfico, atingindo 142 mg por planta (Figura 2).

$$\begin{aligned} \circ \hat{y} (\text{Nano}) &= 41,61 + 150,28x - 56,06x^2 \mid R^2 = 0,99 \\ &F = 23^{**} \\ \blacktriangle \hat{y} (\text{SiNaKE}) &= 39,68 + 84,56x - 42,98x^2 \mid R^2 = 0,99 \\ &F = 15^{**} \\ * \hat{y} (\text{ASiE}) &= 41,25 + 62,48x - 29,98x^2 \mid R^2 = 0,94 \\ &F = 7^{**} \\ \blacksquare \hat{y} (\text{SiK}) &= 42,55 + 60,95x - 33,07x^2 \mid R^2 = 0,75 \\ &F = 9^{**} \end{aligned}$$



**Figura 2.** Acúmulo de silício na parte aérea de plantas de sorgo em função da aplicação de fontes (Nano: nanossílica; ASiE: ácido silícico estabilizado; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado e SiK: silicato de potássio) e concentrações de silício foliar. Jaboticabal, São Paulo, 2016. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; Letras diferentes na mesma concentração diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se que embora, todas as fontes aumentaram o acúmulo de silício, a fonte Nano, promoveu maior acúmulo deste elemento na parte aérea do sorgo, comparado às demais fontes, em todas as concentrações de silício estudadas.

O alto acúmulo de silício nas folhas das plantas de sorgo com a fonte Nano, pode ser explicado pelo fato que embora, seja um dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e insolúvel, mas devido apresentar partículas em nanoescala com tamanho médio de 4,0 nm, possui potencial de absorção foliar nos espaços livre aparente das células, podendo até atravessar a parede celular e acumulando no tecido foliar (JANMOHAMMADI; SABAGHNIA, 2015).

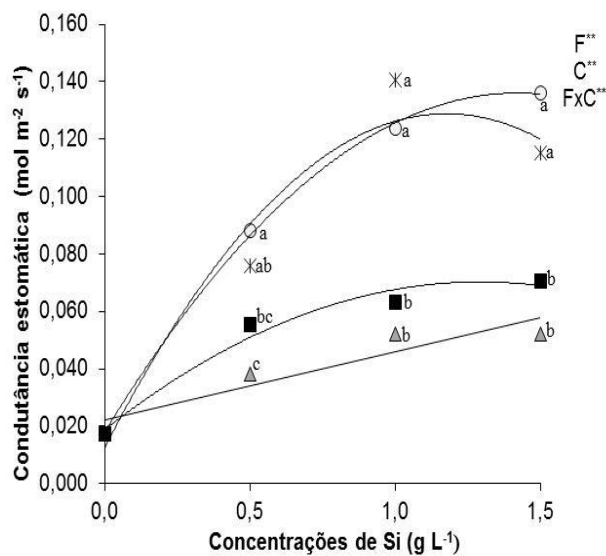
Na taxa de fotossíntese houve interação entre as fontes e concentrações de silício aplicadas via foliar (Figura 3). A aplicação foliar de silício promoveu incremento quadrático na fotossíntese atingindo valor máximo de 16,00; 15,21 e 12,05  $\mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$  nas concentrações 1,10; 1,25 e 1,07 com emprego das fontes Nano; ácido silícico estabilizado (ASiE) e o silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaKE), respectivamente (Figura 3).

Acrescenta-se que na concentração 1,0  $\text{g L}^{-1}$  de Si, próxima da máxima fotossíntese as fontes SiNaKE, e o ASiE, foram semelhantes à fonte Nano, que por sua vez foi melhor que o silicato de potássio (SiK). Resultado semelhante foi obtido por outros autores, com aplicação de silício foliar, no aumento da fotossíntese em diferentes cultivar de trigo (MAGHSOUUDI et al., 2016).



de Si apresentaram resultados semelhantes, diferindo do SiNaKE e SiK que foram iguais (Figura 4). Quanto maior a abertura estomática maior será a capacidade da planta em captar o CO<sub>2</sub> atmosférico, e que conseqüentemente favoreceu a fotossíntese.

$$\begin{aligned} \circ \hat{y} (\text{Nano}) &= 0,017 + 0,16x - 0,058x^2 \mid R^2 = 0,99 \\ &F = 17^{**} \\ \triangle \hat{y} (\text{SiNaKE}) &= 0,020 + 0,023x \mid R^2 = 0,86 \\ &F = 15^{**} \\ * \hat{y} (\text{ASiE}) &= 0,012 + 0,198x - 0,0841x^2 \mid R^2 = 0,94 \\ &F = 36^{**} \\ \blacksquare \hat{y} (\text{SiK}) &= 0,018 + 0,08x - 0,031x^2 \mid R^2 = 0,97 \\ &F = 5^{**} \end{aligned}$$

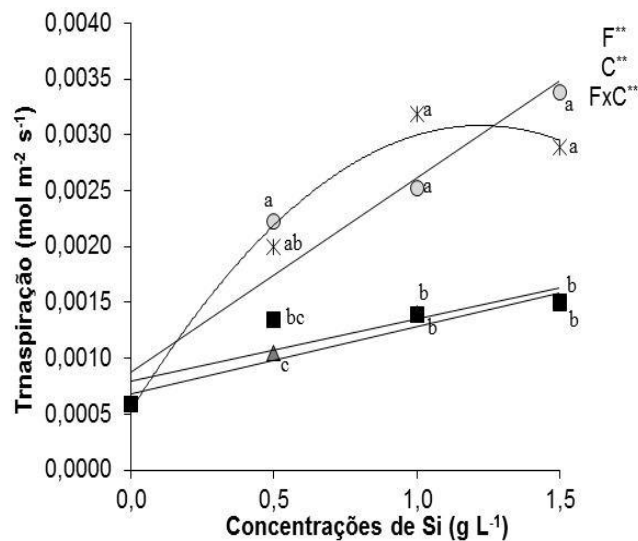


**Figura 4.** Conduância estomática de plantas de sorgo em função da aplicação de fontes (Nano: nanossílica; ASiE: ácido silícico estabilizado; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado e SiK: silicato de potássio) e concentrações de Si foliar. Jaboticabal, São Paulo, 2016. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; Letras diferentes na mesma concentração diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A transpiração foliar atingiu maior valor igual a 0,0034 e 0,0035 mol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> com a utilização de silício foliar na forma de ASiE e a Nano, nas concentrações 1,25 e 1,5 g L<sup>-1</sup> de Si, respectivamente (Figura 5). Outros estudos realizados por Gong e Chen (2012), observaram que aumento da concentração de silício foliar em plantas de trigo aumentou a taxa de transpiração. Quanto maior a abertura estomática,

maiores são as trocas gasosas da planta com o ambiente, refletindo dessa forma, em uma maior taxa de transpiração (RAMOS et al., 2013).

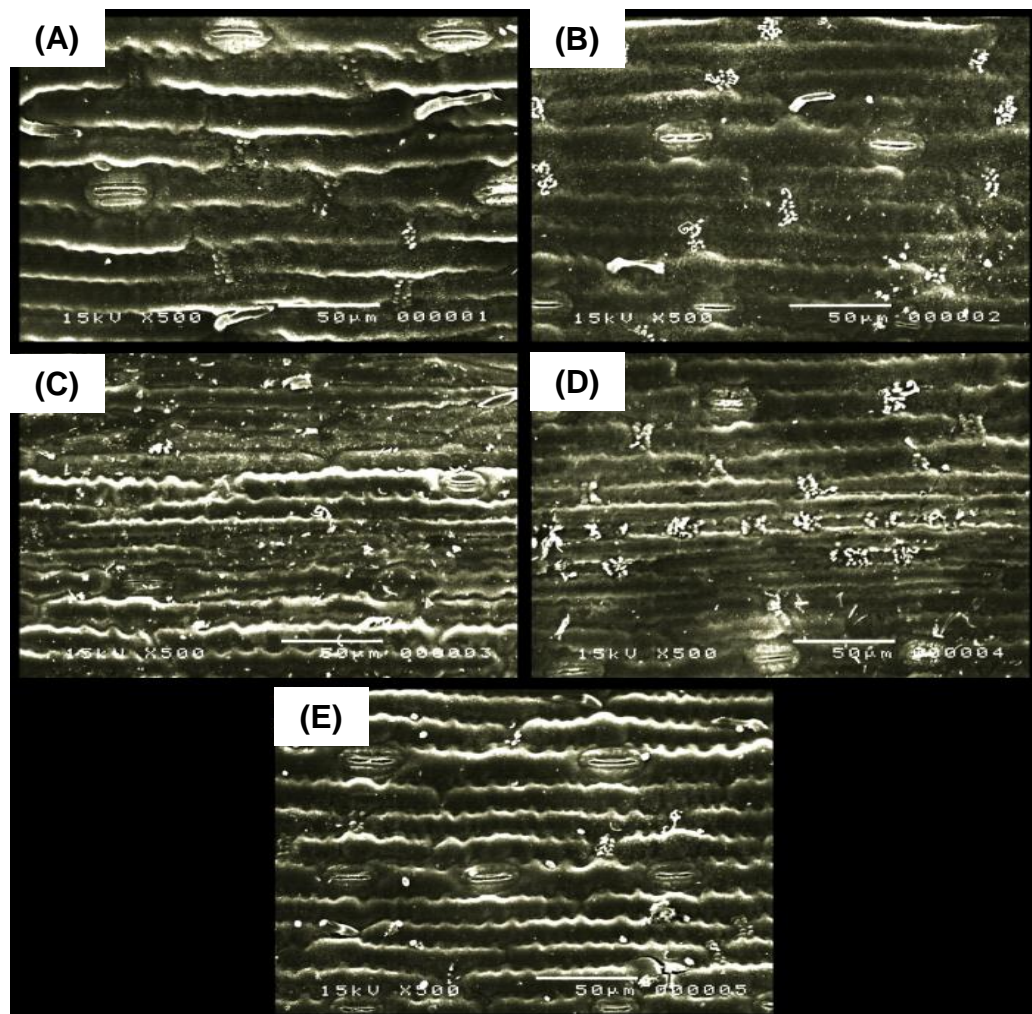
- $\hat{y}$  (Nano) =  $0,0009 + 0,0017x$  |  $R^2 = 0,92$   
F = 101\*\*
- ▲  $\hat{y}$  (SiNaKE) =  $0,0007 + 0,0006x$  |  $R^2 = 0,92$   
F = 12\*\*
- \*  $\hat{y}$  (ASiE) =  $0,0005 + 0,0042x - 0,0017x^2$  |  $R^2 = 0,97$   
F = 20\*\*
- $\hat{y}$  (SiK) =  $0,0008 + 0,0006x$  |  $R^2 = 0,76$   
F = 10\*\*



**Figura 5.** Transpiração de plantas de sorgo em função da aplicação de fontes (Nano: nanossílica; ASiE: ácido silícico estabilizado; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado e SiK: silicato de potássio) e concentrações de Si foliar. Jaboticabal, São Paulo, 2016. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; Letras diferentes na mesma concentração diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O incremento das variáveis fisiológicas com o uso do silício foliar ficou mais evidenciado no presente trabalho, possivelmente devido à ocorrência de altas temperaturas observadas no ambiente de cultivo, onde os valores máximos atingiram 35 a 42 °C (Figura 1). Este efeito benéfico do silício, em plantas fica potencializado sob estresse abióticos de diferente natureza, que é amplamente relatado na literatura (BOKOR et al., 2014; ZHU et al., 2015), mas com poucas informações com estresse térmico. Nota-se que com a aplicação das fontes de

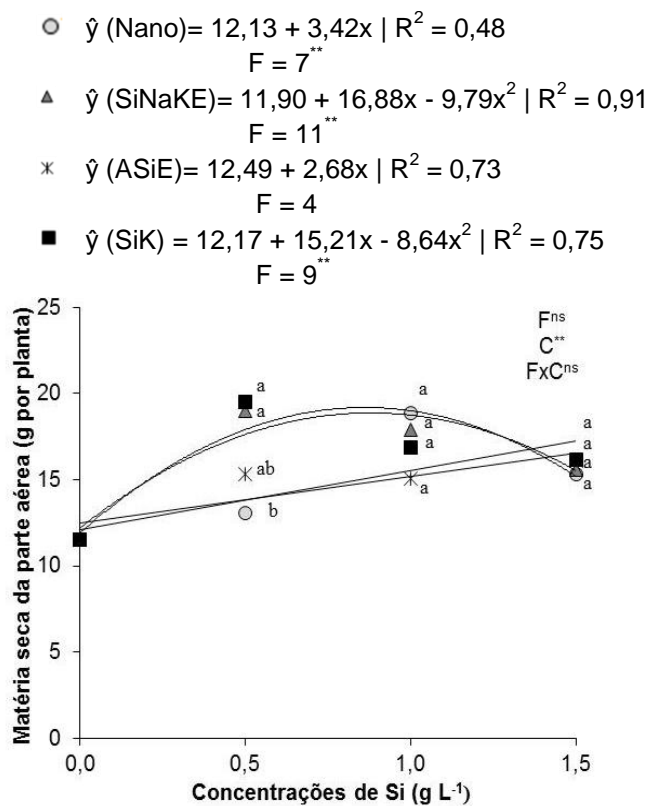
silício, corpos silicosos se tornam mais proeminentes na epiderme foliar (Figuras 6 B, C D e E) em comparação ao tratamento controle (Figura 6 A). Observa-se que no tratamento controle o acúmulo de corpos de silício, se faz presente pelo fato de ser uma espécie acumuladora, o que corrobora com os resultados de Andrade et al. (2012) que observaram a presença de corpos silicosos em folhas de plantas de trigo que não receberam o silício. Possivelmente a água deve ter sido a fonte de fornecimento do silício, que foi absorvido pelas plantas controle.



**Figura 6.** Acúmulo de corpos de silício obtidos através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), na epiderme adaxial, em folhas de sorgo, em menor abundância no tratamento controle (A), e em maior presença com aplicação das fontes ácido silícico estabilizado (B); nanosílica (C); silicato de potássio (D), e silicato de sódio e potássio estabilizado (E). Ampliação = 500x.

Observa-se maior presença e uma distribuição uniforme dos corpos silicosos, quando aplicada a Nano, em comparação ao silicato de potássio (SiK), e as demais fontes, que tiveram uma distribuição irregular dos corpos silicosos na epiderme foliar (Figura 6 C). Essa maior distribuição homogênea pode ser consequência de um maior acúmulo do silício na planta, quando utilizado a fonte Nano (Figura 6 C) favorecendo o aumento das trocas gasosas da planta (Figuras 3, 4 e 5).

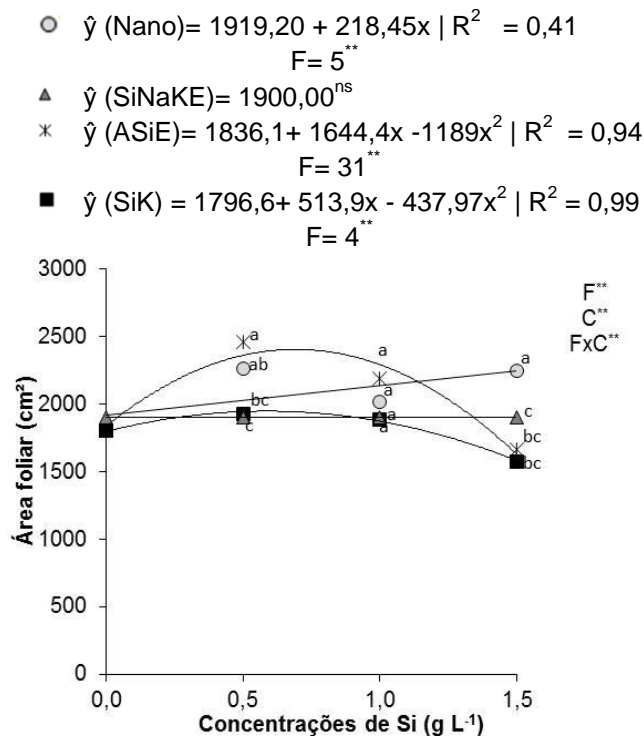
A aplicação foliar de silício promoveu a máxima produção de matéria seca da parte aérea de 18,91 e 19,19 g por planta, nas concentrações 0,88 e 0,86 g L<sup>-1</sup> com emprego das fontes SiK e SiNaKE, respectivamente (Figura 7).



**Figura 7.** Matéria seca da parte aérea de plantas de sorgo em função da aplicação de fontes (Nano: nanossílica; ASiE: ácido silícico estabilizado; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado e SiK: silicato de potássio) e concentrações de Si foliar. Jaboticabal, São Paulo, 2016. \*\* Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup> não significativo; Letras diferentes na mesma concentração diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Outros estudos evidenciaram o aumento de matéria seca da parte aérea proporcionado pelo silício em gramíneas, como arroz (MAUAD et al., 2011) e sorgo (AHMED et al., 2011). Este efeito do elemento benéfico deve-se ao acúmulo do mesmo nas folhas, incrementando a fotossíntese e potencializando o aumento da matéria seca da parte aérea (PULZ et al., 2008; GERAMI, 2012). É importante que seja considerado também a ocorrência do estresse térmico, que pode ter contribuído com a atuação benéfica do silício.

Quanto à área foliar, houve interação entre as fontes e as concentrações de silício aplicado via foliar. A fonte ASiE, na concentração de  $0,70 \text{ g L}^{-1}$  de Si, promoveu incremento quadrático na área foliar, de  $800 \text{ cm}^2$ , aumento de 33% em comparação com a fonte SiK (Figura 8). Observa-se que, na concentração de  $0,5 \text{ g L}^{-1}$  de Si, a fonte ASiE foi semelhante a Nano, diferindo das fontes SiNaKE e SiK. Na concentração de  $1,0 \text{ g L}^{-1}$  de Si, todas as fontes foram iguais; entretanto, na maior concentração empregada de silício a Nano, proporcionou a maior área foliar, diferindo das demais fontes aplicadas (Figura 8).



**Figura 8.** Área foliar de plantas de sorgo em função da aplicação de fontes (Nano: nanossílica; ASiE: ácido silícico estabilizado; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado e SiK: silicato de potássio) e concentrações de Si foliar. Jaboticabal, São Paulo, 2016. \*\*Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup>não significativo; Letras diferentes na mesma concentração diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

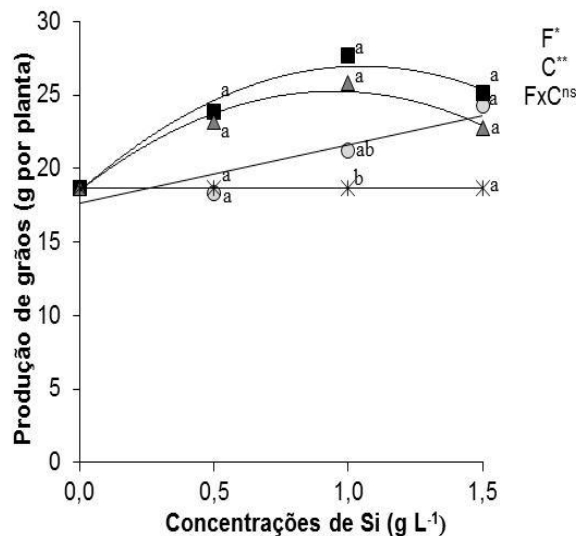
Observa-se que as fontes Nano e ASiE, na concentração de 0,5 g L<sup>-1</sup> de Si, e a Nano, na concentração de 1,5 g L<sup>-1</sup> de Si, apresentaram a maior área foliar, que, por sua vez, foram as que promoveram maior fotossíntese nas plantas, por consequência de terem também proporcionado alta condutância estomática, refletindo em maior transpiração, quando comparadas ao SiK. O maior acúmulo de silício, com a Nano próxima à concentração de 1,5 g L<sup>-1</sup> de Si, influenciou para que a área foliar fosse maior também na maior concentração de silício, potencializando as variáveis fisiológicas e seus efeitos no aumento da matéria seca da planta.

As fontes e concentrações de silício não apresentaram interação para a produção de grãos, porém isoladamente houve diferenças para essa variável analisada dentro do fator fonte e concentração (Figura 9). A aplicação foliar de silício

com o uso das fontes SiK e SiNaKE nas concentrações 1,05 e 0,95 g L<sup>-1</sup> de Si, foram responsáveis por promover um incremento na produção de grãos de 9,0 e 7,0 g por planta, que corresponde a 50 e 39% quando comparado com o tratamento controle respectivamente.

Observa-se que a produção de grãos, com o uso das fontes SiNaKE, SiK e a Nano, na concentração de 1,0 g L<sup>-1</sup> de Si, foram semelhantes, mas as duas primeiras fontes diferiu da fonte ASiE (Figura 9). Em estudos recentes foram observados também incremento na produção com a aplicação de silício foliar com emprego do SiK, na cultura do milho (SOUZA et al., 2010), ASiE em aveia e trigo (SORATTO et al., 2012) e a Nano em arroz (LIU et al., 2014).

$$\begin{aligned} \circ \hat{y} (\text{Nano}) &= 17,69 + 3,92x \quad | \quad R^2 = 0,85 \\ & \quad \quad \quad F = 6^{**} \\ \triangle \hat{y} (\text{SiNaKE}) &= 18,49 + 14,29x - 7,55x^2 \quad | \quad R^2 = 0,97 \\ & \quad \quad \quad F = 4^{**} \\ * \hat{y} (\text{ASiE}) &= 18,00^{\text{ns}} \\ \blacksquare \hat{y} (\text{SiK}) &= 18,44 + 16,242x - 7,74x^2 \quad | \quad R^2 = 0,97 \\ & \quad \quad \quad F = 5^{**} \end{aligned}$$



**Figura 9.** Produção de grãos de plantas de sorgo em função da aplicação de fontes (Nano: nanossílica; ASiE: ácido silícico estabilizado; SiNaKE: silicato de sódio e potássio estabilizado e SiK: silicato de potássio) e concentrações de Si foliar. Jaboticabal, São Paulo, 2016. \*\*, \* e ns Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo respectivamente; Letras diferentes na mesma concentração diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com a aplicação das fontes Nano, SiNaKE e SiK, foram observados aumentos no acúmulo do elemento benéfico na parte aérea, que refletiu principalmente no aumento das trocas gasosas da planta, como a condutância estomática e a transpiração, incrementando principalmente a taxa fotossintética das plantas, contribuindo para um incremento substancial da produção de grãos no sorgo, refletindo em panículas com maior número e/ou enchimento de grãos, com a aplicação foliar de silício.

O ASiE foi a única fonte que não promoveu incremento na produção, com o aumento das concentrações de silício (Figura 9). Uma das hipóteses é que essa fonte, por polimerizar rapidamente após a pulverização na planta, pode ter refletido para não aumentar a produção de grãos, embora tenha proporcionado incrementos na fisiologia, no acúmulo de silício e na matéria seca.

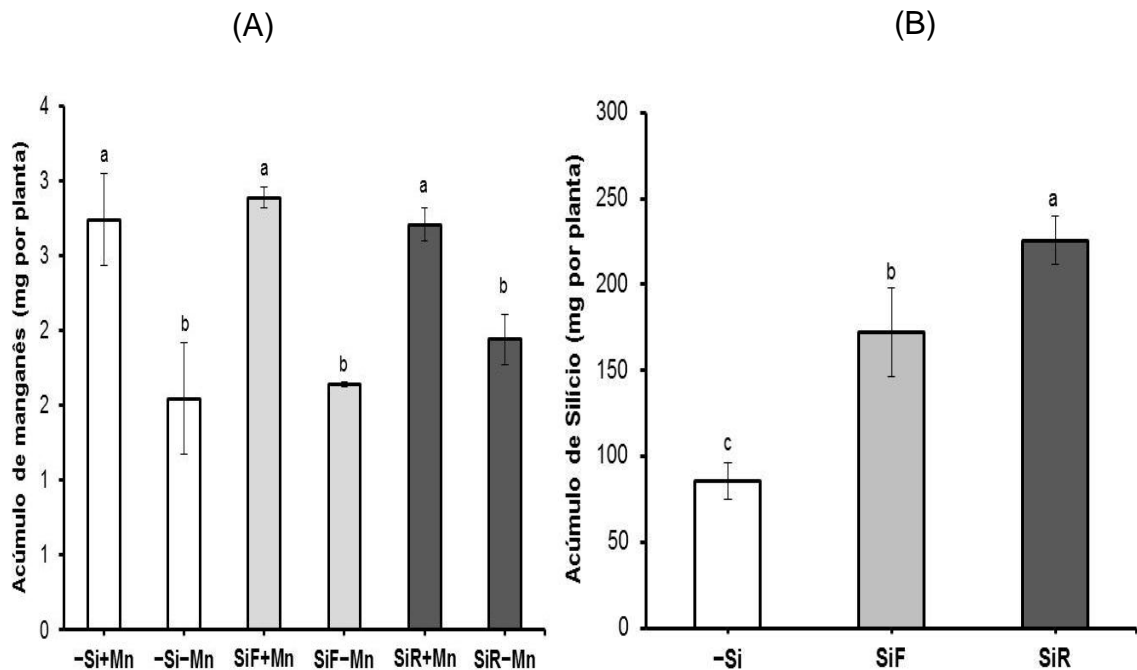
Diante do que foi exposto, este trabalho traz novas informações sobre o potencial de fontes inovadoras para o fornecimento de silício em plantas, comparando com uma fonte padrão (silicato de potássio). Os resultados indicaram que o fornecimento foliar de silício, a partir das fontes com a aplicação de diferentes concentrações, contribui para aumentar a absorção e o acúmulo de silício na planta de sorgo, assim como promoveu incremento na massa seca da parte aérea da planta, área foliar, fotossíntese e produção. Desse modo, o estudo procurou preencher uma lacuna na literatura, trazendo resultados importantes do fornecimento de fontes nanoparticuladas, assim como fontes de silício estabilizadas, podendo vir a ser alternativa para aumentar a absorção de silício pelas plantas.

#### **4.2 Silício na mitigação de estresse causado pela deficiência de manganês em sorgo**

Observa-se que, nos tratamentos deficientes sem o fornecimento de manganês, com e sem silício as plantas tiveram menor acúmulo do micronutriente, em relação aos tratamentos completo que receberam o manganês com e sem silício (Figura 10 A).

O fornecimento de silício via foliar com emprego da fonte silicato de sódio e potássio estabilizado (SiNaKE), aumentou o acúmulo deste elemento benéfico, mas

o silício fornecido via radicular foi mais eficiente que o foliar, proporcionando maior absorção e acúmulo na parte aérea da planta (Figura 10 B). Em plantas acumuladoras de silício, como o sorgo, a absorção radicular é alta dada eficiência dos transportadores de silício, sendo fornecido durante todo o ciclo de cultivo da planta, ao passo que o foliar, a planta recebe o silício em determinadas fases do ciclo de desenvolvimento.

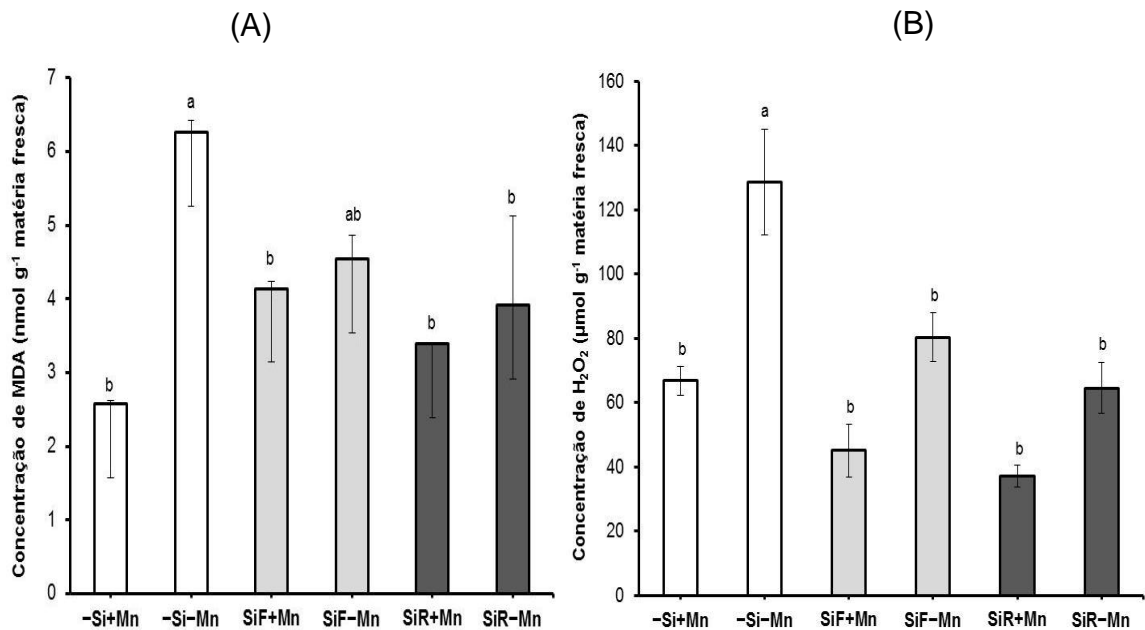


**Figura 10.** Acúmulo de manganês (A) em plantas de sorgo granífero em função dos tratamentos: (-Si+Mn: Sem Si com Mn; -Si-Mn: Sem Si e Mn; SiF+Mn: Si via foliar com Mn; SiF-Mn: Si via foliar sem Mn; SiR+Mn: Si via radicular com Mn e SiR-Mn: Si via radicular sem Mn). Acúmulo de silício (B) em função dos tratamentos: (-Si: Sem Silício; SiF: Silício foliar e SiR: Silício radicular). Letras diferentes mostradas nas barras de erro indicam diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As plantas deficientes de manganês sem o fornecimento de silício, ou com silício foliar, apresentaram alta concentração de malondialdeído (MDA), embora o tratamento deficiente que recebeu o silício via foliar, não diferiu dos demais tratamentos (Figura 11 A). As plantas sob deficiência de manganês, submetidas à

aplicação de silício via radicular, foram mais eficientes na diminuição do estresse em relação ao fornecimento de silício via foliar, possivelmente pelo maior acúmulo de silício, proporcionando maior atividade do sistema de defesa antioxidante da planta. As plantas com deficiência de manganês e sem adição de silício, em relação às plantas com silício ou manganês, apresentaram as maiores concentrações de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), conforme (Figura 11 B).

O aumento da concentração de MDA e  $H_2O_2$ , quando as plantas estão expostas a privação de manganês, comparado às plantas supridas com este micronutriente (Figura 11 A e B), também foi constatado nos trabalhos em plantas de amora e milho (TEWARI et al., 2013; ZHAO et al., 2014). Quando as plantas são submetidas à deficiência de manganês, pode ocorrer principalmente redução na atividade de enzimas do sistema antioxidante da planta, como o superóxido dismutase (SOD), pois o manganês é o principal constituinte, o que contribui para que ocorra um excesso de espécies reativas de oxigênio (ERO), promovendo aumento na concentração de MDA, em condição de estresse (ZHAO et al., 2014).



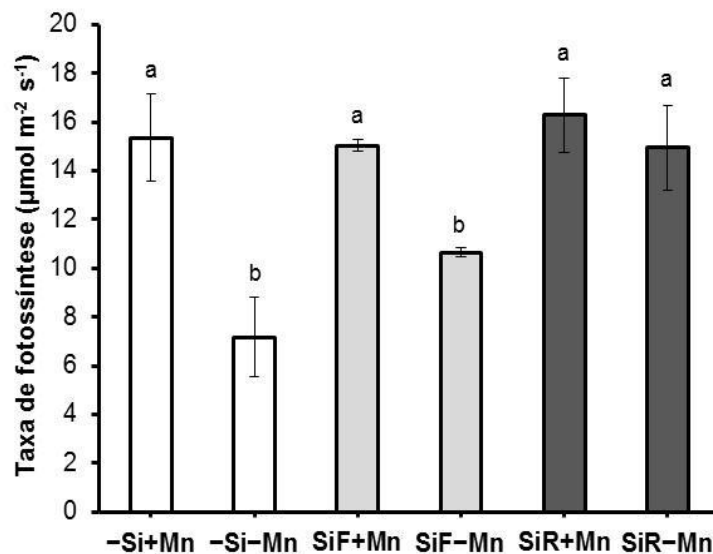
**Figura 11.** Concentração de malondialdeído (A) e peróxido de hidrogênio (B) nas folhas das plantas de sorgo granífero. Jaboticabal, SP, 2017. (-Si+Mn: Sem Si com Mn; Si-Mn: Sem Si e Mn; SiF+Mn: Si via foliar com Mn; SiF-Mn: Si via foliar sem Mn; SiR+Mn: Si via radicular com Mn e SiR-Mn: Si via radicular sem Mn). Letras diferentes mostradas nas barras de erro indicam diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se o papel do silício, na mitigação do estresse por desordem nutricional, causado pela deficiência de manganês, pela diminuição da concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, com emprego do silício foliar ou radicular e do MDA, com fornecimento de silício via radicular, em plantas deficientes deste micronutriente. O silício pode combater o excesso de ERO, pela maior atividade das enzimas antioxidante, em condições de estresses, seja por excesso ou deficiência nutricional (FUHRS et al., 2009; MIAO, 2010).

Os tratamentos que empregaram o manganês na solução nutritiva, e sem manganês, com silício fornecido via radicular, apresentaram maior taxa de fotossíntese em relação aos tratamentos sem aplicação de manganês, sem silício ou com silício foliar (Figura 12). Nas plantas deficientes que receberam a aplicação de silício via radicular, houve maior eficiência do elemento benéfico em evitar a

diminuição da atividade fotossintética das plantas, permanecendo, assim, similar aos tratamentos com manganês (sem estresse).

A redução na atividade fotossintética das plantas sem manganês e silício, e com silício foliar, é consequência da deficiência de manganês, que é conhecida por induzir estresse oxidativo, podendo vir a proporcionar aumentos das ERO, que em excesso reagem com pigmentos clorofilianos e compostos orgânicos afetando a homeostase celular (MARSCHNER, 1995).

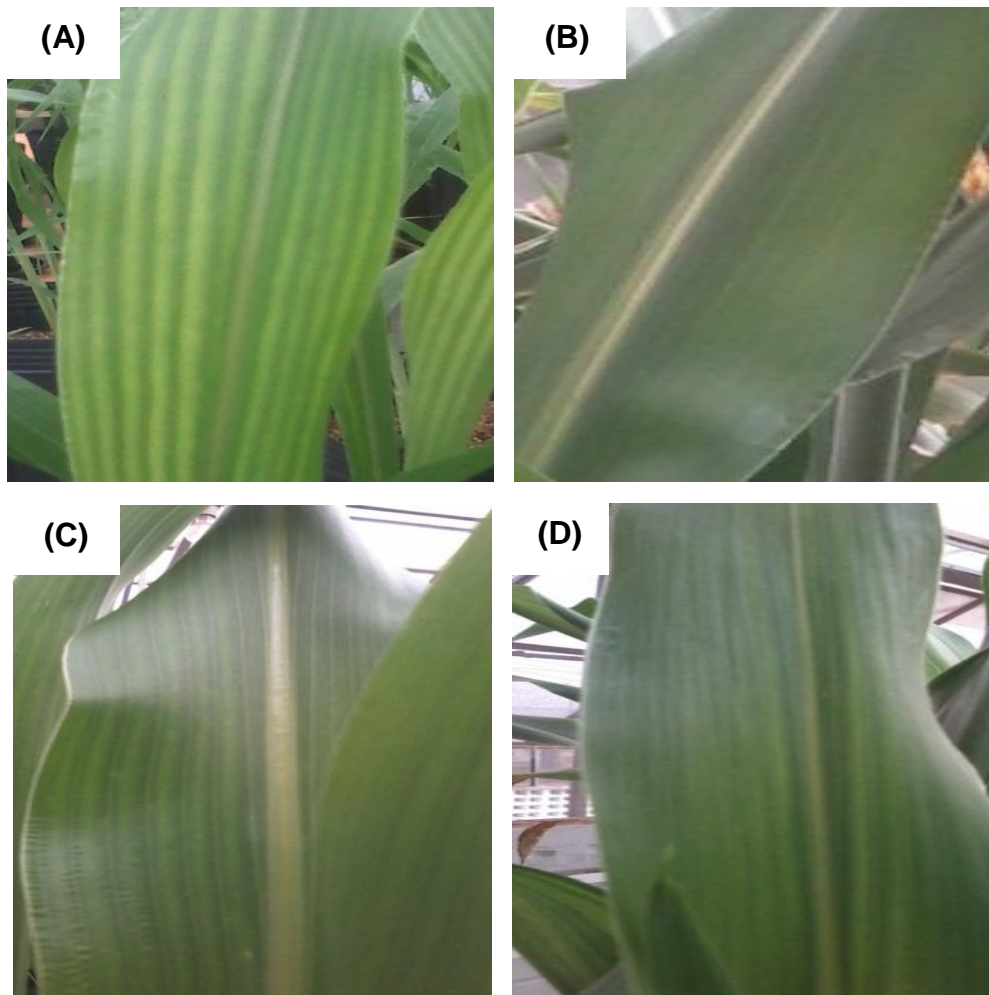


**Figura 12.** Taxa de fotossíntese em plantas de sorgo granífero. Jaboticabal, SP, 2017. (-Si+Mn: Sem Si com Mn; -Si-Mn: Sem Si e Mn; SiF+Mn: Si via foliar com Mn; SiF-Mn: Si via foliar sem Mn; SiR+Mn: Si via radicular com Mn e SiR-Mn: Si via radicular sem Mn). Letras diferentes mostradas nas barras de erro indicam diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A redução na fotossíntese, quando as plantas são cultivadas em meio deficiente de manganês, pode ser também atribuída, principalmente, porque a falta desse micronutriente na planta danifica as estruturas formadas de pigmentos e proteínas, diminuindo a absorção de luz dos cloroplastos, inibindo a síntese de clorofilas, a transferência de energia entre os aminoácidos no complexo pigmento-proteína do PS II, afetando o transporte de energia entre as clorofilas e a evolução do oxigênio no cloroplasto (GONG et al., 2010). As atividades da Rubisco e suas

expressões de genes na planta são também inibidas pela deficiência do micronutriente, afetando a assimilação de  $\text{CO}_2$  e, conseqüentemente o processo fotossintético (GONG et al., 2011).

A baixa taxa de fotossíntese pode ser atribuída, à diminuição do conteúdo de clorofila em plantas deficientes em manganês (Figura 12), evidenciado visivelmente com surgimento de cloroses internerval das folhas de sorgo (Figura 13 A), comparado às plantas cultivadas com manganês sem o fornecimento de silício (Figura 13 B). Observa-se ainda que o fornecimento de silício via foliar (Figura 13 C), ou radicular (Figura 13 D), induziram diminuição da clorose internerval no limbo foliar, o que pode ter favorecido a atividade fotossintética da planta.

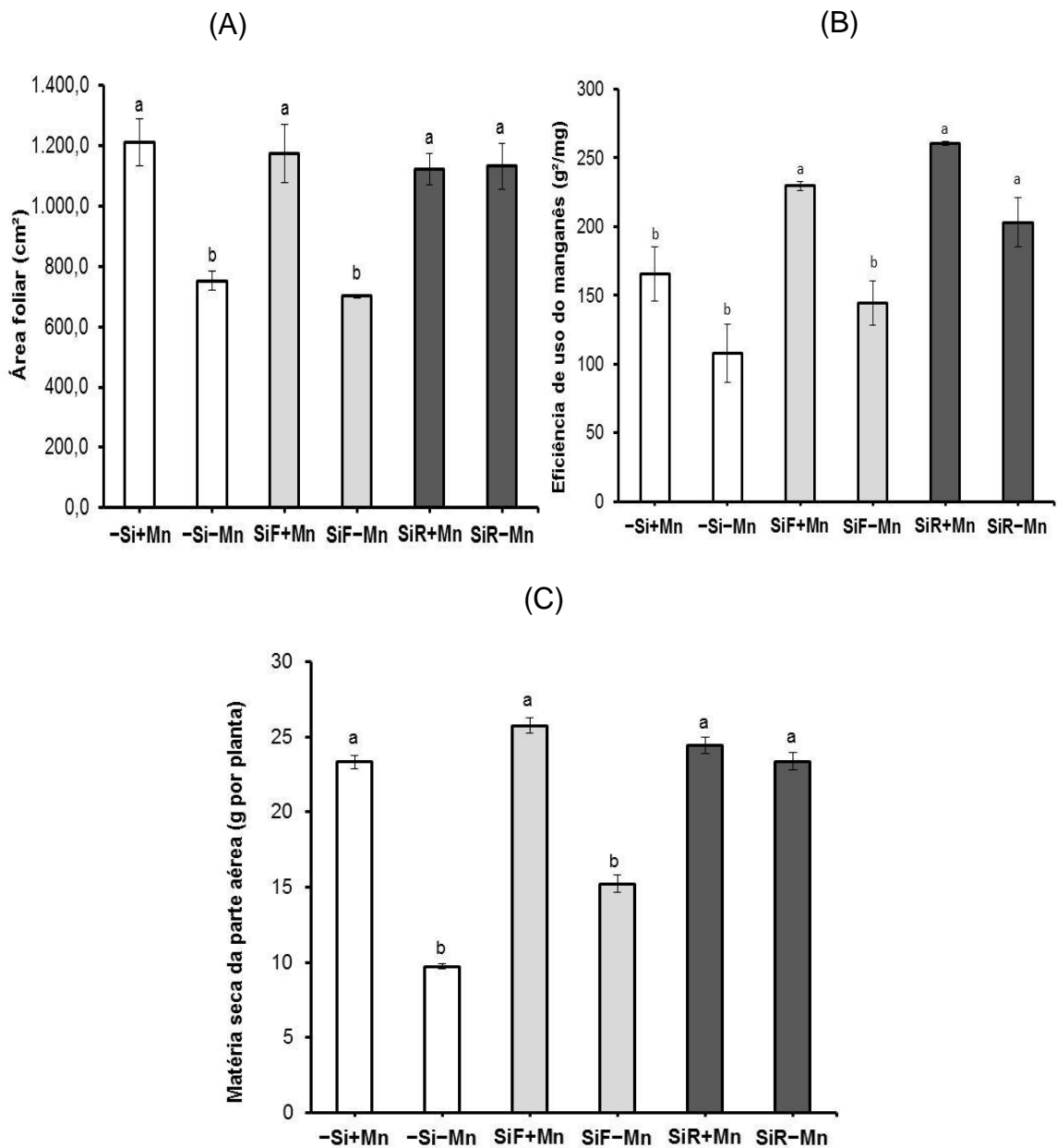


**Figura 13.** Na foto detalhes de plantas de sorgo cultivadas sem manganês e sem silício (A), com manganês e sem silício (B), sem manganês com silício via foliar (C) e sem manganês com silício via radicular (D).

Foi observado, também, diminuição da área foliar das plantas de sorgo cultivadas em meio deficiente de manganês, comparado aos tratamentos com manganês (Figura 14 A). Observa-se que, com a aplicação foliar de silício no tratamento com estresse, as plantas não diferiram do tratamento deficiente sem manganês e silício; entretanto, em contraste, a aplicação radicular de silício impediu a redução da área foliar da planta, permanecendo similar aos tratamentos sem estresse.

Observa-se que os tratamentos deficientes em manganês, sem silício e com silício foliar, houve menor eficiência de uso do micronutriente pela planta; em contrapartida, o tratamento deficiente submetido à aplicação de silício via radicular, foi mais eficiente, não diferindo dos tratamentos com manganês, exceto o que não recebeu silício (Figura 14 B).

Para a matéria seca, os resultados foram muito semelhantes à área foliar, pois nos tratamentos submetidos à deficiência de manganês sem silício e com silício foliar, observa-se redução da matéria seca da parte aérea da planta; porém o tratamento deficiente em manganês, com silício aplicado via radicular, não foi afetado pelo estresse e, com isso, não diferiu dos tratamentos com manganês (Figura 14 C).



**Figura 14.** Área foliar (A), eficiência de uso do manganês (B) e massa seca da parte aérea (C) em plantas de sorgo granífero. Jaboticabal, SP, 2017. (-Si+Mn: Sem Si com Mn; -Si-Mn: Sem Si e Mn; SiF+Mn: Si via foliar com Mn; SiF-Mn: Si via foliar sem Mn; SiR+Mn: Si via radicular com Mn e SiR-Mn: Si via radicular sem Mn). Letras diferentes mostradas nas barras de erro indicam diferenças significativas entre os tratamentos, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados da diminuição da área foliar e da matéria seca reforçam o que foi observado nos trabalhos de Malavolta (1977), na cultura do sorgo, onde os autores afirmaram que a deficiência de manganês afeta a fisiologia da planta. A deficiência de manganês, pelo fato de promover clorose entre as nervuras das folhas, induz menor crescimento da área foliar, que afeta a fotossíntese e, conseqüentemente diminui a produção de matéria seca das plantas (VELOSO et al., 1995). A redução bastante acentuada da matéria seca, nas plantas deficientes sem manganês, sem silício ou mesmo com o silício fornecido foliar, foi reflexo do menor acúmulo de silício e da eficiência de uso do micronutriente, cloroses em maior evidência, menor área foliar que afetou a atividade fotossintética, demonstrando o potencial da deficiência do manganês, em afetar a fotossíntese e os parâmetros de crescimento da planta.

O papel do silício fornecido na planta de sorgo, especialmente fornecido via radicular, em mitigar o estresse por deficiência de manganês, deve-se a diminuição da concentração de  $H_2O_2$  e MDA foliar, favorecendo a fotossíntese, refletindo na melhoria da eficiência de uso de manganês pela planta e induzindo incremento da produção de matéria seca.

## **5 CONCLUSÕES**

A aplicação foliar das fontes nanossilica, silicato de sódio e potássio estabilizado, e silicato de potássio na concentração  $1,0 \text{ g L}^{-1}$  de Si é mais indicada, por proporcionar os maiores acúmulos de silício, com incrementos na fisiologia e na produção de grãos.

O silício mitigou o estresse por deficiência de manganês nas plantas de sorgo, e a aplicação na forma radicular do elemento benéfico foi mais efetiva que a via foliar, evidenciada pela maior atividade fotossintética, área foliar, eficiência de uso do manganês e a matéria seca das plantas.

## 6 REFERÊNCIAS

AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta physiologiae plantarum**, v. 36, n. 2, p. 473-483, 2014.

AHMED, M.; HASSEN, FU.; QADEER, U.; ASLAM, MA. Silicon application and drought tolerance mechanism of sorghum. **African Journal of Agricultural Research**, v. 6, p. 594-607, 2011.

ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell & Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337-1344, 2001.

ANDRADE, F. A.; ANDRADE, C. G.; MIGLIORANZA, E. Detecção de sílica em folha bandeira de trigo. Semina: **Ciências Agrárias**, v. 33, p. 2555-2562, 2012.

BARBOSA, J. C.; JÚNIOR, W. M. Experimentação Agronômica & AgroEstat: Sistema para Análises Estatísticas de Ensaio Agronômicos. Jaboticabal: Gráficas Multipress Ltda, 2016. 396p.

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

BITYUTSKII, N.; PAVLOVIC, J.; YAKKONEN, K.; MAKSIMOVIĆ, V.; NIKOLIC, M. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 74, p. 205-211, 2014.

BOKOR, B.; VACULÍK, M.; SLOVÁKOVÁ, L.; MASAROVIC, D.; LUX, A. Silicon does not always mitigate zinc toxicity in maize. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 3, p. 733-743, 2014.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Secretaria de Defesa Agropecuária Mapa/ACS, 2009. p.399.

CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Nature**, v. 6, p.1-14, 2016.

CHEN, W.; YAO, X.; CAI, K.; CHEN, A. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. **Biological trace element research**, v. 142, n. 1, p. 67-76, 2011.

CRUSCIOL, C. A.; SORATTO, R. P.; CASTRO, G. S.; COSTA, C. H.; NETO, J. F. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 404, 2013.

CUNHA, R. A. **Efeito de adjuvantes sobre absorção de zinco e manganês na adubação foliar**. 59f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, Jataí, 2009.

DRAGICIS MAKSIMOVIĆ, J.; BOGDANOVIC, J.; MAKSIMOVIĆ, V.; NOKOLIC, M. Silicon modulates the metabolism and utilization of phenolic compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown at excess manganese. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 170, n. 6, p. 739-744, 2007.

DUCIC, T.; POLLE, A. Transport and detoxification of manganese and copper in plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, n. 1, p. 103-112, 2005.

FAO. **A economia do sorgo e milho no mundo: fatos, tendências e perspectivas**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/W1808S/w1808s02.htm>>. Acesso: 23 Mar. 2017.

FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horticulturae**, v. 123, p. 521-530, 2010.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

FIGUEIREDO, F. C.; BOTREL, P. P.; TEIXEIRA, C. P.; PETRAZZINI, L. L.; LOCARNO, M.; CARVALHO, J. G. D. Pulverização foliar e fertirrigação com silício nos atributos físico-químicos de qualidade e índices de coloração do morango. **Ciência agrotecnologia** v. 34, n. 5, p. 1306-1311, 2010.

FILHO, I. A. P.; RODRIGUES, J. A. S. **Sorgo: O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Embrapa, 2015, p. 327.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; ALVES, A. U.; GONDIM, A. R. O. Crescimento e nutrição do sorgo (cv. BRS 304) em solução nutritiva. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 2, p.113-124, 2008.

FRANCO, A. A. N. **Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 2011. 74f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 2011.

FÜHR, H.; GÖTZE, S.; SPECHT, A.; ERBAN, A.; GALLIEN, S.; HEINTZ, D.; HORST, W. J. Characterization of leaf apoplastic peroxidases and metabolites in *Vigna unguiculata* in response to toxic manganese supply and silicon. **Journal of experimental botany**, v. 60, n. 6, p. 1663-1678, 2009.

GALVEZ, L.; CLARK, R. B.; GOURLEY, L. M.; MARANVILLE, J. W. Effects of silicon on mineral composition of sorghum grown with excess manganese. **Journal of plant nutrition**, v. 12, n. 5, p. 547-561, 1989.

GOMES, C. F.; MARCHETTI, M. E.; NOVELINO, J. O.; MAUAD, M.; ALOVISI, A. M. T. Disponibilidade de silício para a cultura do arroz, em função de fontes, tempo de incubação e classes de solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 531-538, 2011.

GERAMI, M.; RAMEEH, V. Study of silicon and nitrogen effects on yield components and shoot ions nutrient composition in rice. **Agriculture**, v. 58, p. 93-98, 2012.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, p. 313-321, 2005.

GONG, X.; WANG, Y.; LIU, C.; WANG, S.; ZHAO, X.; ZHOU, M.; HONG, F. Effects of manganese deficiency on spectral characteristics and oxygen evolution in maize chloroplasts. **Biological trace element research**, v. 136, n. 3, p. 372-382, 2010.

GONG, X.; HONG, M.; WANG, Y.; ZHOU, M.; CAI, J.; LIU, C.; HONG, F. Cerium relieves the inhibition of photosynthesis of maize caused by manganese deficiency. **Biological trace element research**, v. 141, n. 1-3, p. 305-316, 2011.

GONG, H.; CHEN, K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 34, n. 4, p. 1589-1594, 2012.

GONZALO, M. J.; LUCENA, J. J.; HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency. **Plant physiology and biochemistry**, v. 70, p. 455-461, 2013.

GOUSSIAS, C.; BOUSSAC, A.; RUTHERFORD, A. W. Photosystem II and photosynthetic oxidation of water: an overview. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 357, n. 1426, p. 1369-1381, 2002.

GRATAO, P. L.; MONTEIRO, C. C.; CARVALHO, R. F.; TEZOTTO, T.; PIOTTO, F. A.; PERES, L. E.; AZEVEDO, R. A. Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 56, p. 79-96, 2012.

HAN, Y.; LI, P.; GONG, S.; YANG, L.; WEN, L.; HOU, M. Defense responses in rice induced by silicon amendment against infestation by the leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis*. **PLoS one**, v. 11, n. 4, p. 11-14, 2016.

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of biochemistry and biophysics**, v. 125, n. 1, p. 189-198, 1968.

HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants a review. **Planta**, v. 240, p. 447-458, 2014.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soil. Berkeley: **California Agricultural Experimental Station**, 1950, 347p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de dados**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso: 31 Jan. 2017.

JANMOHAMMADI, M.; SABAGHNIYA, N. Effect of pre-sowing seed treatments with silicon nanoparticles on germinability of sunflower (*Helianthus annuus*). **Botanica Lithuanica**, v. 2, p. 13-21, 2015.

KIRKBY, E. A.; RÖMHELD, V. Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. **Informações agrônômicas**, v. 118, n. 2, p. 1-24, 2007. Disponível em: <[www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/.../\\$FILE/Encarte-118.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/.../$FILE/Encarte-118.pdf)>. Acesso: 11 Fev. 2017.

KOCHANOVÁ, Z.; JAŠKOVÁ, K.; SEDLÁKOVÁ, B.; LUXOVÁ, M. Silicon improves salinity tolerance and affects ammonia assimilation in maize roots. **Biologia**, v. 69, p. 1164-1171, 2014.

KORNDORFER, G. H. **Uso do Silício na agricultura**, 2017. Disponível em: <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/Silicio/Efeitos/Efeitos.htm>>. Acesso: 16 Jan. 2017.

KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizantes. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004. 34 p. (Boletim técnico, n. 2).

KORNDORFER, G. H. Eficiência do silício como corretivo de solo. **Revista Campo e Negócios**, Uberlândia, ano 4, n. 42, p. 84-85, 2006.

LANA, R. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H.; ZANÃO-JÚNIOR, L. A.; SILVA, A. F. Efeito do silicato de cálcio sobre a produtividade e acumulação de silício no tomateiro. **Bioscience Journal**, v. 19, n. 2, p. 15-20, 2003.

LI, P.; SONG, A.; LI, Z.; FAN, F.; LIANG, Y. Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil**, v. 354, p. 407–419, 2012.

LIANG, Y. C.; YANG, C. G.; SHI, H. H. Effects of silicon on growth and mineral composition of barley grown under toxic levels of aluminum. **Journal of Plant Nutrition**, v. 24, n. 2, p. 229-243, 2001.

LIANG, Y. C.; HUA, H.; ZHU, Y.; CHENG, C.; RÖMHELD, V. Importance of plant species and external silicon concentration to active silicon uptake and transport. **New Phytologist**, v. 172, n. 1, p. 63-72, 2006.

LIU, C.; WEI, L.; ZHANG, S.; XU, X.; LI, F. Effects of nanoscale silica sol foliar application on arsenic uptake, distribution and oxidative damage defense in rice (*Oryza sativa* L.) under arsenic stress. **RSC Advances**, v. 4, n. 100, p. 57227-57234, 2014.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: *Silicon in Agriculture*. Edited by DATNOFF, L. E., KORNDÖRFER, G. H., SNYDER, G. New York: Elsevier science. 2001. p. 17-39.

MA, J. F.; TAMAI, K.; YAMAJI, N.; MITANI, N.; KONISHI, S.; KATSUHARA, M.; YANO, M. A silicon transporter in rice. **Nature**, v. 440, n. 7084, p. 688-691, 2006.

MAGHSOUDI, K.; EMAM, Y.; PESSARAKLI, M. Effect of silicon on photosynthetic gas exchange, photosynthetic pigments, cell membrane stability and relative water content of different wheat cultivars under drought stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n. 7, p. 1001-1015, 2016.

MAKSIMOVIĆ, J. D.; MOJOVIĆ, M.; MAKSIMOVIĆ, V.; RÖMHELD, V.; NIKOLIC, M. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast. **Journal of experimental botany**, v. 63, n. 7, p. 2411-2420, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 319p, 1997.

MALAVOLTA, E.; ACCORSI, W. R.; OLIVEIRA, G. D.; SILVA, A. Q.; SILVA, H.; QUEIROGA, E. G.; ASSIS, V. L. Estudos sobre a nutrição mineral do sorgo granífero: efeitos das deficiências de micronutrientes. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 34, p. 347-352, 1977.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. "Silicon: fertilization and nutrition in higher plants," Amazonian. **Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 4, p. 380-388, 2013.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. p. 889.

MAUAD, M.; CRUSCIOL, C. A. C.; GRASSI FILHO, H. Produção de massa seca e nutrição de cultivares de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, p. 939-948, 2011.

MIAO, B. H.; HAN, X. G.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of botany**, v. 63, p. 1-7, 2010.

MILLALEO, R.; REYESDIAZ, M.; IVANOV, A. G.; MORA, M. L.; ALBERDI, E. M. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010.

MUNEER, S.; JEONG, B. R. Silicon Decreases Fe Deficiency Responses by Improving Photosynthesis and Maintaining Composition of Thylakoid Multiprotein Complex Proteins in Soybean Plants (*Glycine max* L.). **Journal of plant growth regulation**, v. 34, n. 3, p. 485-498, 2015.

OLIVEIRA, R. S.; CANUTO, D. M. F. Absorção de silício pelo sorgo em neossolo quartzarênico adubado com sílica. **Enciclopédia Biosfera**, v. 13, n. 23, p. 40-49, 2016.

PAVLOVIC, J.; SAMARDZIC, J.; MAKSIMOVIĆ, V.; TIMOTIJEVIC, G.; STEVIC, N.; LAURSEN, K. H.; NIKOLIC, M. Silicon alleviates iron deficiency in cucumber by promoting mobilization of iron in the root apoplast. **New Phytologist**, v. 198, n. 4, p. 1096-1107, 2013.

PRADO, R. M. **Nutrição de Plantas**. São Paulo. UNESP, 2008. p. 245.

PULZ, A. L.; CRUSCIOL, C. A. C.; LEMOS, L. B.; SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1651-1659, 2008.

RAMOS, A. R. P.; SANTOS, R. L.; AMARO, A. C. E.; FUMES, L. A. A.; BOARO, C. S. F.; CARDOSO, A. I. I. Eficiência do silicato de potássio no controle do oídio e no desenvolvimento de abobrinha de moita. **Horticultura Brasileira**, v. 31, p. 432-438, 2013.

SAIDI, M. N.; JBIR, R.; GHORBEL, I.; NAMSI, A.; DRIRA, N.; GARGOURI-BOUZID, R. Brittle leaf disease induces an oxidative stress and decreases the expression of manganese-related genes in date palm (*Phoenix dactylifera* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 50, p. 1-7, 2012.

SCHMIDT, S. B.; JENSEN, P. E.; HUSTED, S. Manganese deficiency in plants: the impact on photosystem II. **Trends in plant science**, v. 21, n. 7, p. 622-632, 2016.

SHARMA, C. P.; SHARMA, P. N.; CHATTERJEE, C.; AGARWALA, S. C. Manganese deficiency in maize affects pollen. **Plant and Soil**, v. 138, n. 1, p. 139-142, 1991.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilisation index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilisation efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 4, p. 289-302, 1981.

STICKLER, F. C.; WEARDEN, S.; PAULI, A. W. Leaf area determination in grain sorghum. **Agronomy Journal**, v. 53, n. 3, p. 187-188, 1961.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.; NETO, J. F. Leaf application of silicic acid to white oat and wheat. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 36, n. 5, p. 1538-1544, 2012.

SOUSA, J. V.; RODRIGUES, C. R.; LUZ, J. M. Q.; CARVALHO, P. C.; RODRIGUES, T. M.; BRITO, C. H. Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 4, p. 502-513, 2010.

SURIYAPRABHA, R.; KARUNAKARAN, G.; YUVAKKUMAR, R.; PRABU, P.; RAJENDRAN, V.; KANNAN, N. Application of silica nanoparticles for increased silica availability in maize. **AIP Conference Proceedings**, v. 1512, n. 1, p. 424-425, 2013.

TEWARI, R. K.; KUMAR, P.; SHARMA, P. D. Oxidative stress and antioxidant responses of mulberry (*Morus alba*) plants subjected to deficiency and excess of manganese. **Acta physiologiae plantarum**, v. 35, n. 12, p. 3345-3356, 2013.

VELOSO, C.; MURAOKA, T.; MALAVOLTA, E.; CARVALHO, J. G. Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira do reino. **Scientia Agricola**, v. 52, n. 2, p. 376-383, 1995.

XIE, Y.; LI, B.; ZHANG, Q.; ZHANG, C. Effects of nano-silicon dioxide on photosynthetic fluorescence characteristics of *Indocalamus barbatus* McClure. **Journal of Nanjing Forestry University**, v. 2, p. 59-63, 2012.

ZANETTI, L. V. **Efeitos da pulverização foliar com silício na tolerância de *Theobroma cacao* L. (Malvaceae) ao déficit hídrico**. 2013. 60f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Vitória, 2013.

ZHAO, H. Q.; WANG, L.; HONG, J.; ZHAO, X. Y.; YU, X. H.; SHENG, L.; HONG, F. S. Oxidative stress of maize roots caused by a combination of both salt stress and manganese deprivation. **Cereal Research Communications**, v. 42, n. 4, p. 568-577, 2014.

ZHU, Y. X.; XU, X. B.; HU, Y. H.; HAN, W. H.; YIN, J. L.; LI, H. L.; GONG, H. J. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. **Plant cell reports**, v. 34, n. 9, p. 1629-1646, 2015.

YUVAKKUMAR, R.; ELANGO, V.; RAJENDRAN, V.; KANNAN, N. S.; PRABU, P. Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). **International Journal of Green Nanotechnology**, v. 3, n. 3, p. 180-190, 2011.