

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

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO
DE SILÍCIO AUMENTA COMPOSTO FENÓLICO,
EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E A PRODUÇÃO DE
GRÃOS DA CULTURA DA SOJA**

Ian Lucas de Oliveira Rocha
Engenheiro Agrônomo

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CAMPUS DE JABOTICABAL

**PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO
DE SILÍCIO AUMENTA COMPOSTO FENÓLICO,
EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E A PRODUÇÃO DE
GRÃOS DA CULTURA DA SOJA**

Ian Lucas de Oliveira Rocha

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

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

2021

R672p Rocha, Ian Lucas de Oliveira
Pulverização foliar de manganês com adição de silício
aumenta composto fenólico, eficiência fotossintética e a
produção de grãos da cultura da soja / Ian Lucas de Oliveira
Rocha. -- Jaboticabal, 2021
57 p.

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

Orientador: Renato Mello de Prado

1. Nutrição de plantas. 2. Glycine max. 3. Elemento benéfico.
4. Estresse nutricional. 5. Estresse abiótico. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal





CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO DE SILÍCIO AUMENTA COMPOSTO FENÓLICO, EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E A PRODUÇÃO DE GRÃOS DA CULTURA DA SOJA

AUTOR: IAN LUCAS DE OLIVEIRA ROCHA
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

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


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


Prof. Dr. EVANDRO FREIRE LEMOS (Participação Virtual)
UEMG / Passos/MG


Pós-Doutoranda ALINE PEREGRINA PUGA (Participação Virtual)
EMBRAPA/Meio Ambiente / Jaguariúna/SP

Jaboticabal, 06 de maio de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Ian Lucas de Oliveira Rocha nasceu na cidade de Passos, MG, em 5 de agosto de 1997, filho de Maria Rosa de Oliveira Rocha e Ernande Francisco Rocha. Possui título de Engenheiro Agrônomo (2020) pela Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Acadêmica de Passos. Nessa instituição, atuou como bolsista de iniciação científica nos anos de 2016 a 2019, período em que realizou trabalhos nas áreas de Nutrição de plantas, Física do Solo e Qualidade do Leite. Atuou como estagiário nos seguintes segmentos: Laboratório de Análise de Solo e Tecido Foliar – UEMG (2015 – 2016), Laboratório de Análises e Produtos Alimentícios – UEMG (2016), Laboratório de Mecânica e Física do Solo (MEMFIS) – UFVJM (2017), Fazenda Ninfas – Monitoramento de pragas e doenças da cultura do milho e soja (2018-2019) e AP Agrícola Grãos e Cereais LTDA (2019-2020). Em março de 2020, ingressou no mestrado do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal, com orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado e, atualmente, compõe o Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas da Unesp (GENPLANT).

“Decifra-me, mas não me conclua, eu posso te surpreender”.

Clarice Lispector.

À minha família, minha mãe Maria Rosa de Oliveira Rocha, meu pai Ernande Francisco Rocha e minhas irmãs Gracielle e Gabriele pelo afeto, amor, apoio e força em todo os momentos.

DEDICO E OFERE

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por todas as oportunidades e desafios que tem me proporcionado, os quais me tornam uma pessoa melhor.

À minha família, principalmente a meus pais, Maria Rosa de Oliveira Rocha e Ernande Francisco Rocha, pelos ensinamentos e por comprarem meu sonho, que agora, depois de tanta luta, suor, dificuldade, estamos quase a concretizar. Eu lhes serei grato eternamente por isso.

Às minhas irmãs Gracielle e Gabriele, por todo o companheirismo.

Aos amigos (irmãos do coração), Leandro Aparecido Chiconi, Caio Cazetta Rodrigues Silva e Gabriela Faria do Santos. Vocês são a família que a vida me permitiu escolher e, durante esta trajetória, fizeram-se presentes; saibam que nossa amizade sempre será motivo de orgulho para mim.

À República Abatedouro – Unesp Jaboticabal e os “agregados”, Patrícia, Renata e Victor, que me acolheram de forma tão humana e que hoje me refiro a esse lugar como casa, e as amigades/irmãos criados ali sempre serão lembrados.

Aos amigos / colegas da Pós-graduação, Juan Ricardo, Gelza Carliane, Antônio Márcio, Mariana Bomfim, Antônio Santana, Marcilene dos Santos, Amanda Manduca, João Carlos, Eduarda Reis, Jonas Pereira e, especialmente, Dalila Lopes, Kamilla Oliveira e Paula Wellen, por toda a troca de conhecimento que me fez crescer como pessoa e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pela confiança, disponibilidade, paciência e por todos os ensinamentos repassados de forma tão humilde e valiosa para meu crescimento durante o período do mestrado.

Aos meus professores, Dr. Pedro Luís, Dr. Wanderley, Dr. Marcílio e Dr. Alan Panosso e, em especial, à Dra. Mara Cristina, por favorecerem meu

crescimento na profissão, cedendo ensinamentos valiosos sobre Agronomia nos mais variados campos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Obrigado!

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

SUMÁRIO

Resumo	ii
Abstract	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Importância do manganês para as plantas	3
2.2. Importância da pulverização foliar de Mn na cultura da soja	5
2.4. Interação Si e Mn	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. Condição de crescimento e tratamentos estudados	10
3.2. Variáveis analisadas	12
3.2.1. Índice relativo de clorofila	12
3.2.2. Eficiência quântica do fotossistema II	12
3.2.3. Conteúdo de fenóis totais	12
3.2.4. Índice relativo de vazamento celular	13
3.2.5. Altura de plantas, diâmetro de caule, área foliar e produção de massa seca	13
3.2.6. Quantidade, produção e teor de proteína nos grãos	14
3.2.7. Acúmulo de Si e Mn	14
3.3. Análise estatística	15
4. RESULTADOS	15
5. DISCUSSÃO	23
6. CONCLUSÃO	27
REFERÊNCIAS	28
APÊNDICE	39

PULVERIZAÇÃO FOLIAR DE MANGANÊS COM ADIÇÃO DE SILÍCIO AUMENTA COMPOSTO FENÓLICO, EFICIÊNCIA FOTOSSINTÉTICA E A PRODUÇÃO DE GRÃOS DA CULTURA DA SOJA

Resumo - A pulverização foliar de manganês (Mn) é importante na cultura da soja pela deficiência do micronutriente nos solos em diferentes regiões do mundo. O emprego da pulverização foliar de Mn com adição de Si seria uma estratégia a fim de potencializar a resposta da cultura, mas faltam pesquisas para melhor compreensão dos mecanismos fisiológicos e nutricionais envolvidos. Para isso, realizou-se esta pesquisa com o objetivo de avaliar se os efeitos do Mn combinado com Si, na calda de pulverização foliar, favorecem as respostas biológicas das plantas de soja sob deficiência de Mn. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação em esquema fatorial 4 x 2, sendo constituído por quatro concentrações (0,00; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹), combinado com zero Si e a concentração de Si igual a 0,48 g L⁻¹, na forma de silicato de potássio, dispostos em delineamento de blocos casualizados com cinco repetições. A aplicação dos tratamentos foram via foliar em quatro estádios fenológicos da cultura V6; V8; R1 e R2. A pulverização foliar de Mn (0,63 g L⁻¹) associado com Si (0,48 g L⁻¹) propiciou a máxima produção de grãos de soja. O mecanismo do Si, para ampliar o efeito do Mn, foi revelado, iniciando-se pela diminuição do estresse, ao aumentar o composto antioxidante fenol total, causando diminuição do índice de vazamento celular. Esse fato favoreceu o incremento do índice relativo de clorofila e da eficiência quântica do fotossistema II, propiciando incrementos na altura, área foliar, massa seca da parte aérea, número de grãos por planta e na produção e no teor de proteína de grãos.

Palavras-chave: Nutrição de plantas. *Glycine max*. Elemento benéfico. Estresse nutricional. Estresse abiótico.

**FOLIAR APPLICATION OF MANGANESE WITH ADDED SILICON
INCREASES PHENOLIC COMPOUNDS, PHOTOSYNTHETIC EFFICIENCY
AND GRAIN YIELD OF SOYBEAN CROP**

Abstract - The foliar application of manganese (Mn) is important on soybean crop due to micronutrient deficiency in soils in different regions of the world. The use of leaf spraying of Mn with Si addition would be a strategy to enhance the crop response, but research is lacking to better understand the physiological and nutritional mechanisms involved. For this purpose, this research was carried out with the objective of evaluating whether the effects of Mn combined with Si in the leaf spray syrup favors the biological responses of soybean plants under Mn deficiency. The experiment was conducted in a greenhouse with a factorial scheme 4 x 2 being constituted by four concentrations (0.00; 0.29; 0.58 and 0.87 g L⁻¹) combined with zero Si and the concentration of Si equal to 0.48 g L⁻¹ in the form of potassium silicate, laid out in a randomized design with five repetitions. The treatments were done via foliar application in the four phenological stages of growth V6; V8; R1 and R2. The foliar application of Mn (0.63 g L⁻¹) combined with Si (0.48 g L⁻¹) has provided the maximum grain yield of soybean. The mechanism of Si that enhances the effect of Mn was revealed starting with the reduction of stress when increasing the total phenolic antioxidant compound, causing depletion in the relative rate of cell leakage. This favored the increment of the relative rate of chlorophyll, the quantum yield of photosystem II and providing increase in height, leaf area, and dry mass of the aerial part, number of pods per plant, yield and the level of protein in grains.

Keywords: Plant Nutrition; Glycine max; Beneficial element; Nutritional stress; Abiotic stress.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Valores máximos e mínimos da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (UR%), durante o desenvolvimento do experimento, em casa de vegetação, contabilizando dias após a emergência (DAE). As setas indicam as condições climáticas encontradas na 1^a, 2^a, 3^a e 4^a aplicação foliar em plantas de soja e, também, o período de coletas das plantas. 11
- Figura 2** - Acúmulo Si (A) e Mn (B) na parte aérea de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês (Mn), na presença (+Si) e na ausência de silício (-Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM). 16
- Figura 3** - Índice relativo de clorofila A (A), índice relativo de clorofila B (B), índice relativo de clorofila total (C), eficiência quântica do fotossistema II (PSII) (D), conteúdo fenólico total (E) e vazamento de eletrólitos celular (E) de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês (Mn), na presença (+ Si) e na ausência de silício (- Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} não significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM). 18
- Figura 4** - Altura de plantas (A), diâmetro de caule (B), área foliar (C) e massa seca da parte aérea (D) de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês (Mn), na presença (+ Si) e na ausência de silício (- Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} não significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM). 20
- Figura 5** - Número de grãos (A), produção de grãos (B) e teor de proteína no grão de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês (Mn), na presença (+ Si) e na ausência de silício (- Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} não significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM). 22

- Figura 6** - Imagem da folha trifoliolada de plantas de soja com sintoma de deficiência de Mn que recebeu pulverização somente de água (ausência de Mn e Si) durante a condução do experimento. 24
- Figura 7** - Imagens das plantas de soja, nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29 , 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹) realizadas durante o período de condução do experimento. 39
- Figura 8** - Imagens das plantas de soja nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29 , 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹) realizadas durante o período de condução do experimento. 40
- Figura 9** - Imagens das plantas de soja nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29 , 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹) realizadas durante o período de condução do experimento. 41
- Figura 10** - Imagens de vagens de plantas de soja nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29 , 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹) realizadas durante o período de condução do experimento 42

1. INTRODUÇÃO

A deficiência de manganês (Mn), em cultivos de soja, tem sido frequente e é intensificada em solos naturalmente alcalinos ou induzida por calagem excessiva, principalmente em regiões de solos intemperizados (Mousavi et al., 2011) ou advento do plantio de soja transgênica (Roundup Ready®), que, após a aplicação do herbicida, provoca uma deficiência induzida na planta (Nava et al., 2012).

Assim, a baixa disponibilidade do Mn no solo, normalmente, deve-se ao alto valor pH, que aumenta a atividade microbiana complexando o Mn e pode estar adsorvido a óxidos que diminuem a sua solubilidade na solução do solo (Nogueira e Cardoso, 2002).

Neste cenário de deficiência de Mn, as funções biológicas desse nutriente na planta ficam comprometidas, havendo baixa atividade enzimática e biossíntese de metabólitos primários (Alejandro et al., 2020) e diminuem compostos fenólicos visto em *Tanacetum parthenium* (Farzadfar et al., 2017). Essa deficiência agrava o estresse, a partir da desestabilização e a desintegração de complexos do fotossistema II, que induz ao aumento desordenado de espécies reativas de oxigênio (Kim et al., 2017), conseqüentemente ao estresse oxidativo (Schmidt et al., 2015). Isso provoca diminuição da fotossíntese (Schmidt et al., 2016) pela degradação da clorofila (Papadakis et al., 2007) e pela diminuição da eficiência quântica do fotossistema II (Lichtenthaler et al., 2005), induzindo sintomas como clorose internerval das folhas novas (Marschner's, 2011).

Para atender a demanda do micronutriente nas plantas de soja, tem sido amplamente empregada a pulverização foliar, beneficiando o crescimento e a produção, embora as pesquisas sejam limitadas (Niu et al., 2020), especialmente, na definição adequada da concentração de Mn na calda, o que é motivo de preocupação.

O emprego do silício (Si) seria uma estratégia, para diminuir os efeitos prejudiciais da deficiência nutricional em plantas (Buchelt et al., 2020), a exemplo do Mn em plantas de sorgo (Oliveira et al., 2019) e de milho (Oliveira et al., 2020).

Além disso, o elemento benéfico poderia potencializar a resposta da planta submetida à aplicação foliar do micronutriente, embora as pesquisas abordem apenas o efeito isolado do Si. Há possibilidade de ocorrer, porque há relatos que as aplicações foliares de Si incrementam a eficiência quântica do fotossistema II e os teores de

clorofila foliar de plantas sem deficiência de Mn (Hussain et al., 2021). Além disso, o Si atua de forma indireta no aumento da capacidade de defesa antioxidante da cultura da soja (Hussain et al., 2021), ao diminuir a produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) (Miao et al., 2010), a partir do aumento de compostos fenólicos, observado na cultura da cevada (Vega et al., 2019).

Neste cenário, pode ser relevante explorar o possível sinergismo do fornecimento de Mn e de Si na mesma calda para a pulverização foliar, fato promissor, porque um estudo pioneiro formulou em laboratório esses dois elementos juntos e evidenciou que a pulverização foliar de Mn foi potencializada com associação do Si na calda, mas foi restrito às Poáceas (milho e sorgo), em que utilizaram, como fontes, quelato de Mn (13% de EDTA) e silicato de potássio estabilizado (Oliveira et al., 2020). Este estudo foi realizado em espécies acumuladoras de Si, não havendo relatos para espécies não acumuladoras do elemento incluindo a cultura da soja.

Diante da importância de a pulverização foliar de Mn na cultura da soja, é importante haver melhor compreensão dos mecanismos benéficos do Si, nessa espécie, a partir da resposta para duas hipóteses: i) o fornecimento de Si via pulverização foliar associado com manganês garante absorção adequada dos dois elementos nas plantas de soja indicando adequada compatibilidade. Essa resposta é pertinente, porque existe risco da solução com Si polimerizar na presença de cátions (Lindsay, 1979) e poderia inviabilizar a absorção foliar dos dois elementos; ii) a pulverização foliar, com diferentes concentrações de Mn associado ao Si, em relação à sua ausência, beneficia a produção de grãos da cultura, a partir da diminuição do estresse visto pela redução do vazamento de eletrólitos, favorecendo o aumento do teor de clorofila e a eficiência quântica do fotossistema II, em razão da produção de antioxidante fenóis totais e, em consequência, a massa seca das plantas de soja.

Se aceitas essas hipóteses, deve surgir uma nova estratégia, a fim de potencializar os efeitos da adubação foliar de Mn no cultivo de soja, a partir da adição de Si na calda de pulverização, podendo ter aplicação global, dado o cultivo da oleaginosa em muitas regiões de clima tropical ou subtropical.

Para isso, realizou-se esta pesquisa com o objetivo de avaliar se os efeitos do Mn combinado com Si, na calda de pulverização foliar, favorecem as respostas biológicas das plantas de soja sob deficiência de Mn.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância do manganês para as plantas

O manganês (Mn) é um importante micronutriente para o crescimento e desenvolvimento das plantas e mantém papéis metabólicos em diferentes compartimentos celulares (Marschner's, 2011). Em termos de abundância nos solos tropicais, ele é superado somente pelo ferro. No entanto diversos processos no solo governam sua solubilidade, que é diminuída na solução do solo (Millaleo et al., 2010). No metabolismo vegetal, ele pode atuar tanto como nutriente de planta quanto elemento tóxico, dependendo de seus teores nos tecidos vegetais (Millaleo et al., 2015).

O processo de absorção do Mn pelas plantas se dá via raízes sendo transportado pelo xilema predominantemente na forma iônica Mn^{+2} (Marschner's, 2011). Embora as plantas necessitem de níveis reduzidos de Mn, para suprir o desenvolvimento, a sua falta pode causar uma série de prejuízos ao ciclo da cultura (Felisberto, 2018). A deficiência pode ser expressa, mesmo com a ausência de sintomas visuais, dificultando as estimativas de dimensão, bem como a elaboração de uma estratégia de controle (Schmidt et al., 2016). Trabalhos destacaram níveis, para suprir a demanda no desenvolvimento normal da cultura, que correspondem a valores para soja de 20-100 mg kg⁻¹ (Mills e Jones, 1996 ; Peck, 1979), 35 – 50 mg kg⁻¹ (Malavolta, 2006).

As funções do micronutriente no metabolismo vegetal envolvem, principalmente, sua participação no processo fotossintético, uma vez que está relacionado ao complexo enzimático atuante, na reação de Hill, na quebra da molécula de água. Desse modo, esse elemento atua nas reações que permitem a transferência de elétrons para o fotossistema II (Eyster et al., 1958)

Além disso, o Mn desempenha um importante papel como cofator de mais de 35 enzimas vegetais, incluindo descarboxilase, desidrogenase e oxidase (Fageria, 2001 ; Alejandro et al., 2020), atua na biossíntese de aminoácidos (Alejandro et al., 2017), na ativação hormonal (Schmidt et al., 2013), em níveis adequados de lignina, fenóis

e lipídeos (Campbell e Nable, 1988) e, sobretudo, na associação com proteínas do complexo de evolução do oxigênio (OEC), em que é indispensável na geração de energia fotossintética (Bloom e Lancaster, 2018).

O Mn também está ligado no processo de desintoxicação de espécies reativas de oxigênio (ERO), nas células vegetais, por ser cofator da enzima MnSOD localizada nas mitocôndrias e peroxissomos (Oliveira et al., 2019b). Por essas razões, a deficiência de Mn nas plantas tem como alvo duas funções celulares essenciais: capacidade antioxidante e atividade fotossintética (Alejandro et al., 2020).

Como resultado da limitação do nutriente, desenvolve-se na planta um distúrbio latente, sem sintomas visuais, que mascara a distribuição e dimensão do problema, resultando em clorose internerval nas folhas mais jovens que são visíveis somente quando o desenvolvimento da planta está comprometido (Malavolta, 2006). Sob deficiência severa, as folhas apresentam manchas pardas necróticas, refletindo no menor crescimento, área foliar e diminuição da produção de matéria seca (Saidi et al., 2012).

Outro efeito da deficiência de Mn é refletido na eficiência fotossintética, na qual são observados uma diminuição do número de cloroplastos (Simpson e Robinson, 1984) e centros funcionais do fotossistema II dentro das pilhas de grana que se torna bastante reduzidos (Kirchhoff, 2014). Conforme o agravamento da deficiência nutricional, a estrutura dos cloroplastos se torna significativamente alterada (Long et al., 2020), refletindo nas membranas dos tilacoides que se tornam desorganizadas (Roose et al., 2016).

Fato esse que contribui para que plantas deficientes de Mn apresentem baixos valores de fluorescência da clorofila (F_v / F_m), sugerindo baixo desempenho fotossintético. Isso se deve ao menor número de elétrons passando pelo fotossistema (baixo F_m) e ao aumento da fotoinibição de FS II (alto F_0) (Schmidt et al., 2015). No entanto as aplicações foliares com o micronutriente podem reverter significativamente os danos no FSII (Schmidt et al., 2013).

Como resultado do não suprimento de Mn, as plantas podem apresentar diminuição da área foliar e da massa seca, que reforçam os resultados encontrados por Mann et al. (2002) e Gettier et al. (1985), na cultura da soja, quando afirmam que

a deficiência de Mn afeta a fisiologia da planta e, em decorrência, seus ganhos produtivos (Velooso et al., 1995).

2.2. Importância de a pulverização foliar de Mn na cultura da soja

Existem ocorrências de deficiência de Mn, em solos cultivados de cerrado, em razão do uso excessivo de calcário e adubações desbalanceadas que resultam no desequilíbrio químico do solo (Mousavi et al., 2011). O uso intenso de cultivos sucessivos e que contenham teores baixos de matéria orgânica do solo (MOS) podem resultar na deficiência desse micronutriente (Mascarenhas et al., 2014).

A deficiência de Mn pode ser corrigida pela aplicação de diferentes fontes de nutriente via solo e via folha (Oliveira et al., 2000; Oliveira, 2019). Contudo a eficiência da aplicação do Mn via solo é considerada baixa, necessitando da aplicação de doses consideradas altas quando se trata de um micronutriente (Neocleous et al., 2020). A eficiência agrônômica dessas fontes de Mn depende das características intrínsecas do fertilizante e, mesmo após a sua aplicação, podem ocorrer deficiências, mostrando assim que nem todo o Mn, contido nos fertilizantes, está disponível para as plantas (Lopes, 1999).

Para reverter os sintomas de deficiência, as aplicações foliares são amplamente utilizadas como uma alternativa para fornecer o micronutriente de forma eficiente tendo rápida absorção foliar (Ohki et al., 1987).

Um estudo comparando duas formas de aplicação de Mn na cultura da soja, Mann et al., (2001) concluíram que a adubação foliar indicou ser mais eficiente, quando comparada à aplicação via solo, constituindo uma forma econômica para a correção de deficiência de Mn. Resultados semelhantes foram evidenciados por Pinto (2012), que relatou incremento na produtividade na cultura da soja quando submetida a aplicações foliares de Mn.

A adubação foliar de Mn tem sido muito utilizada, porque as quantidades requeridas de micronutrientes pelas plantas é relativamente baixa e permitem sua aplicação via folha, pois é suficiente para nutrir a planta (Mocellin, 2004 ; Albrecht et al., 2020). Outra vantagem seria a rápida resposta das plantas, sendo possível corrigir deficiências, após seu aparecimento, durante a fase de crescimento das plantas,

embora, em alguns casos, os rendimentos da cultura já possam estar comprometidos (Silverberg et al., 1972).

É importante relatar que as aplicações foliares de Mn são eficazes para atender a necessidade da planta por um período de tempo limitado (Li et al., 2017), pois esse nutriente é muito pouco móvel na planta e não remobiliza folhas mais velhas para folhas jovens, exigindo a necessidade de reaplicações do micronutriente durante o ciclo da cultura (Prado, 2021). Nesse sentido, existem estudos indicando que o aumento da frequência de aplicação foliar do Mn aumenta a resposta da cultura comparado a apenas uma aplicação durante o seu ciclo (Monreal et al., 2016 ; Fageria et al., 2009).

A fonte de Mn utilizada para a pulverização foliar deve ser solúvel, podendo ser sais como o sulfato e cloreto, ou fontes quelatadas, em que pares de elétrons do nutriente formam ligações coordenadas na formação de um complexo ligante orgânico hexadado ETDA (Neocleous et al., 2020).

Mann et al.(2002) observaram em seus trabalhos que o uso de fontes de Mn, na forma de quelatos, destacou-se de sais. As fontes quelatizadas apresentam melhores respostas às plantas pela sua menor retenção à cutícula foliar (Oliveira, 2019), favorecendo o seu transporte para a parte aérea comparada a outras fontes como os sais (Wallace, 1963).

É interessante ressaltar que as recomendações de adubação foliar de Mn divergem entre si, não havendo consenso sobre a dose do nutriente por área ou melhor concentração do elemento da calda utilizada para a cultura da soja.

Em um estudo realizado por Mann et al., (2002), foram avaliadas as aplicações foliares de Mn em plantas de soja; verificaram que a diferença entre a produtividade média da testemunha e a maior produtividade foi verificada nos tratamentos com parcelamento das doses de 450 e 600 g ha⁻¹ de Mn, nos estádios V4 e V8, sendo constatado um aumento de 1.291 g ha⁻¹ e 1.431 g ha⁻¹, correspondente a um acréscimo de 55% e 61%, respectivamente. Os autores complementam que, para a correção da deficiência de Mn na soja, a aplicação nas folhas é mais eficiente que a aplicação no solo.

Oliveira Júnior et al. (2000), em um estudo em vasos preenchidos com solo (Mn em DTPA: 3,1 mg dm⁻³) cultivados com a cultura da soja, avaliaram a aplicação foliar

na concentração de 0,6%, na forma de sulfato de manganês com intervalo de duas semanas, a partir do estágio R1, indicando que foi eficiente para aumentar a produção de grãos da cultura.

A aplicação foliar de Mn, na forma de quelato (EDTA), na dose de 0,17 kg ha⁻¹ de Mn, favoreceu aumento da produção da cultura da soja (Randall et al., 1975).

Enderson et al. (2015) não verificaram incremento de produção, ao submeterem as plantas de soja à aplicação foliar, na dose de 185 g ha⁻¹, utilizando fonte quelatizada (Mn-EDTA) nos estágios fenológicos V5 e R3. Loecker et al. (2010), entretanto relataram que a aplicação foliar de Mn – glucoheptano de 0,22 e 0,45 kg ha⁻¹, nos estádios reprodutivos R1, R3 e R6, incrementaram a produção de soja transgênica, mesmo sendo cultivada em solos em que havia alta disponibilidade de Mn e, portanto não se esperava resposta à adubação com esse micronutriente.

Baseado no exposto, observa-se que o avanço de pesquisas sobre pulverização foliar de Mn, na cultura da soja, é muito restrito e pouco explorado, sendo os trabalhos existentes sobre a eficiência agrônômica de fontes e concentrações de Mn incipientes, o que gera preocupação, visto ser uma prática muito empregada na cultura da soja.

2.3. Silício (Si) na mitigação de estresses em plantas

O silício (Si) é considerado um elemento benéfico ou útil, por desempenhar um papel importante no metabolismo e na atividade fisiológica e/ou estrutural, melhorando a sobrevivência das plantas superiores expostas a diferentes estresses abióticos e bióticos (Prado et al., 2019 ; Epstein e Bloom, 2006 ; Debona et al., 2017). Esse elemento está presente na solução do solo sob a forma de ácido monomérico ou monossílico (H₄SiO₄) sendo absorvido pelo sistema radicular (Liang et al., 2007).

Apesar do impressionante avanço das pesquisas sobre a temática, o papel preciso do Si, na mitigação dos distúrbios da deficiência de nutrientes em plantas, permanece amplamente desconhecido e, em particular, o potencial para sua aplicação prática perdura inexplorado (Coskun et al., 2019).

Com relação às principais áreas de pesquisas que envolvem o Si em plantas superiores podem-se destacar: sua absorção, seu papel nutricional e o mecanismo (s) pelo qual confere proteção contra estresses bióticos e abióticos (Liang et al., 2014).

Quanto à forma de absorção, as plantas apresentam formas diferentes de absorverem o Si, a ativa, passiva ou exclusiva que irão classificar em diferentes categorias: plantas acumuladoras ($> 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si), acumuladoras intermediárias ($5 - 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) e excludoras (ou não acumuladora) ($< 5 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) (Trembath-Reichert et al., 2015 ; Hodson et al., 2005). Em plantas acumuladoras de Si, o seu efeito benéfico é mais evidente (Oliveira et al., 2020).

Após absorvido, o H_4SiO_4 é translocado pelo xilema à parte aérea e se deposita na parede celular das células da epiderme das folhas, na camada subcuticular e nos espaços intercelulares. À medida que a água evapora ou é transportada para outro tecido, o H_4SiO_4 se condensa em sílica gel polimerizada, não podendo ser redistribuído pela planta, tornando-se imóvel (Ma e Takahashi, 2002).

Quando fornecido às plantas, o Si evita a degradação de clorofila, especialmente em plantas submetidas ao estresse, produz espécies reativas de oxigênio (ERO) que provocam danos celulares (Alejandro et al., 2020). O Si parece aumentar a expressão de genes que regulam a síntese e atividade de enzimas importantes ao metabolismo e sistema antioxidante, responsáveis por combater as espécies reativas de oxigênio diminuindo os danos do estresse oxidativo (Brunings et al., 2009 ; Liang et al., 2007).

Vale salientar que os estudos que envolvem a interação do Si e Mn concentram-se mais em plantas cultivadas, em condições de toxicidade de Mn, o que deixa uma lacuna sobre a atuação desse elemento em condições de deficiência. Li et al. (2012) observaram que cultivares de arroz expostas à toxicidade de Mn obtiveram tolerância aumentada por Si, pois o elemento benéfico aumentou a ação dos antioxidantes não enzimáticos nas cultivares de arroz em estudo. Em trabalhos mais recentes na cultura do pepino, Dragisic e Maksimovic (2020) puderam constatar que o silício impediu a formação de intermediários tóxicos (OH e Mn^{3+}), pois o seu acúmulo induz à oxidação de fenólicos livres, o indicador inicial dos sintomas de toxicidade desse micronutriente.

Ao analisar a relação de Mn e o Si, nota-se que resultados promissores foram observados, em que o elemento benéfico incrementou o acúmulo do Mn por aumentar o índice relativo de clorofila, a eficiência quântica do FSII e a eficiência do uso da água, resultando em aumento de produção de massa seca das plantas de milho e de sorgo (Oliveira et al., 2020). Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira

et al. (2019), que evidenciaram que a aplicação de Si, em plantas de sorgo deficiente de Mn, obtiveram maior atividade fotossintética e eficiência de uso do micronutriente.

Diante do exposto, evidencia-se a carência de pesquisas ressaltando o papel do Si, na mitigação de estresse por deficiência de Mn e na possível potencialização da resposta da cultura da soja ao fornecimento de Mn, que ainda permanece desconhecido.

2.4. Interação Si e Mn

Vale salientar que, nos últimos anos, diversas pesquisas vêm sendo realizadas com relação à nutrição, usando o Si (Artyszak, 2018), pois esse elemento tem efeitos benéficos à limitação dos efeitos adversos de estresses abióticos. Estudos anteriores indicam efeitos benéficos do Si sob condições de estresse imposto, como: salinidade (Ali et al., 2013), temperatura alta ou baixa, déficit de água (Teixeira et al., 2020), toxicidade por metais pesados (Millaleo et al., 2010) e, atualmente, esse elemento tem se destacado como mitigador de desordens nutricionais (Liang et al., 2015 ; Prado et al., 2019).

Em estudos que envolvem o Mn, predominam trabalhos que correlacionam o Si na atenuação dos efeitos de toxicidade desse micronutriente (Dragisic & Maksimovic, 2020 ; Ling et al., 2016 ; Dragisic-Maksimovic et al., 2016 ; Blamey et al., 2018). E também há trabalhos que evidenciam as ações benéficas do elemento Si submetido a aplicações em plantas deficientes desse micronutriente (Oliveira et al., 2019a ; Oliveira et al., 2020 ; Bityutskii et al., 2014).

Na tentativa de melhorar o desempenho das pulverizações de Mn nas culturas anuais, algumas pesquisas têm associado esse micronutriente ao elemento benéfico silício (Si), na cultura do sorgo (Oliveira et al., 2019), milho (Oliveira et al., 2020) e pepino (Bityutskii et al., 2014) havendo resultados promissores. No entanto são incipientes as pesquisas sobre a interação do Mn e do Si, quando submetidos a pulverizações foliares na cultura da soja, o que levanta um importante ponto a ser debatido, pois as pulverizações foliares com o micronutriente são usuais para esse cultivo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Condição de crescimento e tratamentos estudados

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, no Campus de Jaboticabal com latitude de 21°14'47.00”S e longitude de 48°17'44.73”O de Greenwich.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em um esquema fatorial 4 x 2, sendo quatro concentrações de manganês (0,0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹), na forma de quelato de Mn (Mn-EDTA: 13%) combinado com ausência de Si e a concentração de 0,48 g L⁻¹ de Si, na forma de silicato de potássio (137,0 g L⁻¹ de Si, 164,4 g L⁻¹ de K₂O), com aditivos sorbitol, ácido fúlvico e ácido salicílico, com cinco repetições. Para os tratamentos sem a adição de Si, realizou-se pulverização foliar com K na forma de KCl para o ajuste na concentração desse elemento. As taxas de Mn foram escolhidas com base em valores da literatura (Staut, 2007).

A unidade experimental foi constituída por vasos de polipropileno com capacidade de 7,0 dm³ (diâmetro superior: 16 cm; diâmetro inferior: 11 cm, altura: 33 cm), preenchidos com 6 dm³ de areia textura média lavada previamente com solução ácida e água deionizada, contendo três plantas por vaso.

O experimento foi realizado, utilizando a cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) cultivar NS 7709, que tem ciclo precoce e hábito de crescimento indeterminado. Realizou-se a semeadura da soja nos vasos e, dez dias após a emergência (DAE), realizou-se o desbaste, mantendo três plantas por vaso.

Realizou-se a aplicação de água deionizada e, aos dez dias após a emergência (DAE), iniciou-se a aplicação de solução nutritiva de Hoagland and Arnon (1950), com modificação da concentração de Fe (180 µmol L⁻¹) e da fonte de ferro Fe-EDTA, para Fe-EDDHA e com a omissão de Mn, para induzir a deficiência nas plantas.

Realizou-se o ajuste do valor pH da solução nutritiva para 5,5 ± 0,5, com uso da solução de HCl (1,0 mol L⁻¹) ou NaOH (1,0 mol L⁻¹). O fornecimento da solução nutritiva à planta foi realizado iniciando com força iônica de 15% e aumentando até atingir 75% aos 60 DAE e mantida até o final do experimento.

A aplicação dos tratamentos, via foliar, foi realizada com pulverizador manual, em quatro estágios fenológicos: V6 (cinco trifólios completamente desenvolvidos); V8

(sete trifólios completamente desenvolvidos); R1 (início do florescimento tendo uma flor aberta em qualquer nó sobre a haste principal) e R2 (início da formação de vagens), correspondendo ao volume de calda pulverizada iguais a 5,4; 11,8; 17,8 e 30,2 mL por vaso, respectivamente.

A classificação dos estádios de desenvolvimento da cultura seguiu proposta de Oliveira Junior et al. (2016), e o volume de calda utilizado, para cada unidade experimental, foi quantificado, após a aplicação foliar e reservado em béqueres para que, em laboratório utilizando-se pipeta, fosse quantificado de forma precisa o volume gasto durante a aplicação dos tratamentos. Para as aplicações foliares, a superfície do vaso foi coberta com camada de algodão e de papel absorvente para evitar deriva no substrato e absorção dos elementos químicos pelas raízes.

A calda para a pulverização foi mantida a pH igual a 7,0 para todos os tratamentos com o uso da solução de HCl (1,0 mol L⁻¹) ou NaOH (1,0 mol L⁻¹).

A umidade relativa e a temperatura do ar foram registradas, durante todo o período experimental, incluindo, no momento de as pulverizações foliares, tendo umidade relativa do ar iguais a: 86, 98, 82 e 85%, para primeira, segunda, terceira e quarta aplicação foliar, respectivamente (Fig. 1).

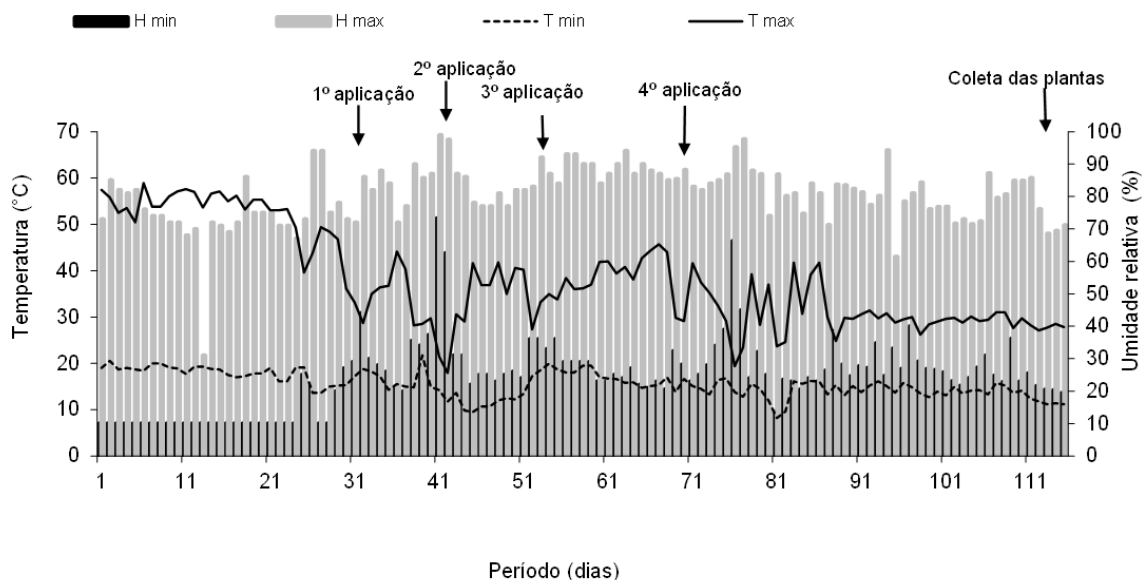


Figure 1- Valores máximos e mínimos da temperatura (°C) e umidade relativa do ar (UR%), durante o desenvolvimento do experimento, em casa de vegetação, contabilizando dias após a emergência (DAE). As setas indicam as condições climáticas encontradas na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª aplicação foliar, em plantas de soja e, também, o período de coleta das plantas.

3.2. Variáveis analisadas

3.2.1. Índice relativo de clorofila

O índice relativo de clorofila (IRC) foi obtido 96 DAE, avaliando-se folhas mais novas completamente desenvolvidas que receberam a última pulverização foliar que foram marcadas na ocorrência da pulverização. A estimativa de IRC foi realizada com auxílio do aparelho medidor indireto de clorofila Opti-sciences® CCM – 200 com uma média de cinco leituras por planta. Foram obtidos os valores indiretos de clorofila A e B e, pela somatória, os valores do índice relativo de clorofila total.

3.2.2. Eficiência quântica do fotossistema II

A eficiência quântica do fotossistema II (F_v / F_m) foi obtida nos 99 DAE, a partir da medida da fluorescência da clorofila, com o auxílio do fluorômetro (Opti-sciences - Os30P). Para isso, a região amostrada foi submetida ao escuro para adaptação de, no mínimo, 30 minutos antes da excitação do pulso de luz vermelha de um segundo. Obtiveram-se as seguintes leituras: F_0 (fluorescência mínima para excitação da clorofila) e F_m (fluorescência máxima para excitação da clorofila). A partir desses parâmetros, foi obtido a F_v (variação na fluorescência calculada a partir de F_0 e F_m), F_v/F_m (razão de fluorescência variável e fluorescência máxima) e F_v/F_0 (razão de fluorescência variável e fluorescência mínima).

As medidas foram realizadas entre 6h30 e 7h30 no quarto trifólio, a partir do ápice completamente desenvolvido e que recebeu a última aplicação foliar com os tratamentos.

3.2.3. Conteúdo de fenóis totais

A extração foi obtida, segundo a metodologia proposta por Singleton e Rossi (1965), a partir da coleta de 0,1 g de folhas frescas, no período de 100 DAE, transferidas para tubos de falcon de 15 mL cobertos com lâmina de alumínio, diluídas em metanol concentrado em banho-maria a 25 °C, durante 3 horas.

Para a reação colorimétrica, transferiu-se 1 mL do extrato filtrado, para outro tubo falcon de 15 mL coberto com lâmina alumínio e completou-se o volume com 10 mL de água e 0,5 mL de Folin-Ciocalteu 2 N, mantido em repouso por 3 minutos;

decorrido o tempo, adicionou-se 1,5 mL de carbonato de sódio 20% e novamente deixou reagir por 2 horas.

Ao término, realizou-se a leitura da absorbância das amostras em espectrofotômetro (765 nm). Amostras controle foram elaboradas, seguindo todos os procedimentos citados, com exceção do material fresco.

3.2.4. Índice relativo de vazamento celular

Para a análise do vazamento celular, foram retirados aos 100 DAE, cinco discos foliares por planta, sendo retirados do quarto trifólio, a partir do ápice completamente desenvolvido e que recebeu a última aplicação foliar com os tratamentos. Posteriormente os discos foliares foram submergidos, em 20 ml de água deionizada, em um béquer à temperatura ambiente por 2 horas, segundo preceitos de Dionisio-Sese e Science (1998).

A condutividade elétrica da solução (EC1) foi medida em um medidor de condutividade de bancada (medidor digital TDS – 3). Logo após a aferição, as amostras foram submetidas à autoclave a 121°C por 20 minutos e, após resfriamento, realizou-se uma nova leitura para a obtenção da condutividade elétrica final (EC2).

O índice de vazamento celular foi determinado a partir da fórmula: $EC1 / EC2 \times 100$.

3.2.5. Altura de plantas, diâmetro de caule, área foliar e produção de massa seca

As avaliações biométricas foram realizadas aos 103 DAE as quais serão descritas a seguir.

A altura de plantas foi quantificada, a partir de fita métrica da base do colmo ao ápice da última folha completamente desenvolvida, sendo os valores expressos em metros (m).

O diâmetro do caule foi obtido, utilizando paquímetro digital em aço, modelo FORTGPRO-FG8331, no qual foram posicionados dois centímetros da superfície de areia em que as plantas foram cultivadas, na intenção de se manter maior uniformidade e precisão na avaliação.

A área foliar das folhas da parte aérea foi quantificado utilizando o aparelho integrador de área foliar LICOR 3100.

Em seguida, o material vegetal (folhas e caules) foi submetido à lavagem em solução detergente (0,1%, v:v), ácido clorídrico (0,3%, v: v) e água deionizada (Prado, 2020). Logo depois, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel devidamente identificados e levados à secagem em estufa com ventilação forçada a 65°C, até apresentarem massa constante. Em seguida, o material vegetal foi pesado em balança analítica de precisão e determinada a massa seca da parte aérea da planta.

3.2.6. Quantidade, produção (g por planta) e teor de proteína nos grãos

Aos 115 DAE, coletaram-se as vagens das plantas de soja, na maturidade fisiológica e, logo após, realizou-se a debulha manualmente, contabilizando o número de grãos por planta. A produção de grãos (g por planta), todavia foi obtida a partir da massa com a umidade corrigida para 13%.

Para a determinação do teor de proteína, os grãos foram lavados em solução detergente (0,1%, v:v), ácido clorídrico (0,3%, v: v) e água deionizada (Prado, 2020). As amostras secas foram moídas em moinho tipo Willey, usando-se peneira de 20 mesh, para posterior análise química. O nitrogênio (N) foi determinado, a partir da digestão das amostras em ácido sulfúrico, destilação com destilador Kjeldahl e titulação em solução de ácido sulfúrico (Bataglia et al., 1983).

O teor de proteína no grão foi calculado pelo produto do teor de nitrogênio da amostra e fator de correção (FC = 6,25) proposto por Quast (1966).

3.2.7. Acúmulo Si e Mn

Para a determinação do acúmulo de Si e Mn, o material vegetal, após coletado, foi lavado em solução detergente (0,1%, v:v), ácido clorídrico (0,3%, v: v) e água deionizada (Prado, 2020).

As amostras secas foram moídas em moinho tipo Willey, usando-se peneira de 20 mesh, para posterior análise química. Os teores de silício foram determinados, empregando a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010), por digestão úmida, usando-se peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e hidróxido de sódio (NaOH), elevando-se a temperatura em estufa de circulação de ar a 120°C por 4 horas para induzir a reação. A leitura do extrato foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm,

pelo método de colorimetria com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato de amônio (Korndörfer et al., 2004).

A determinação dos teores totais de manganês foi obtida seguindo o método descrito por Bataglia et al. (1983). Os acúmulos de Si e Mn foram calculados pelo produto da massa seca e teor dos elementos, dados em miligrama (mg) por planta.

3.3. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo Teste de F. As comparações entre as médias das adubações foliares de manganês (Mn), na presença e ausência de silício (Si), foram realizadas pelo Teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Os efeitos das concentrações de Mn foram avaliados, a partir do estudo de regressão polinomial, sendo os modelos escolhidos com teste F significativo a 5% de probabilidade e com os maiores valores dos coeficientes de determinação (R^2). Para a análise estatística, empregou-se o software SAS versão 9.1 (SAS Institute, 2004). As figuras foram obtidas com o auxílio do programa SigmaPlot versão 14.0.

4. RESULTADOS

O acúmulo de Si nas plantas depende da concentração de Mn e do Si na calda empregada para pulverização foliar (Fig. 2A). O aumento da concentração de Mn, na calda na ausência ou na presença de Si, incrementou o acúmulo desse elemento benéfico nas folhas das plantas de soja. O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, promoveu maior acúmulo do elemento benéfico, na parte aérea das plantas de soja, em todas as concentrações de Mn empregadas (Fig. 2A).

O acúmulo de Mn nas plantas depende da concentração de Mn e do Si na calda empregada para a pulverização foliar (Fig. 2B). O aumento da concentração de Mn, na calda na ausência ou na presença de Si, incrementou o acúmulo do micronutriente nas folhas das plantas de soja. O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, promoveu maior acúmulo de Mn, na parte aérea das plantas de soja, em todas as concentrações empregadas (Fig. 2B).

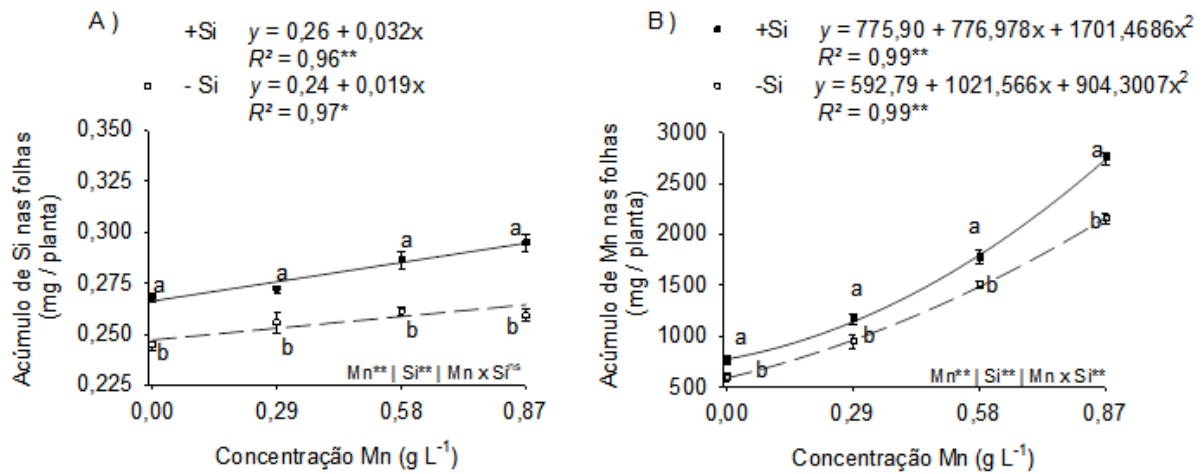


Figure 2- Acúmulo Si (A) e Mn (B), na parte aérea de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês (Mn) na presença (+Si) e na ausência de silício (-Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM).

A pulverização foliar de Mn aumentou o índice relativo de clorofila A, independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações de Mn iguais 0,49 e 0,50 g L⁻¹, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 3A). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o índice relativo de clorofila A, nas concentrações iguais a zero; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ (Fig. 3A).

A pulverização foliar de Mn aumentou o índice relativo de clorofila B, independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações de Mn iguais 0,54 e 0,56 g L⁻¹, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 3B). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o índice relativo de clorofila B nas concentrações iguais a 0,29 e 0,58 (Fig. 3B).

A pulverização foliar de Mn aumentou o índice relativo de clorofila total, independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações de Mn iguais 0,53 e 0,56 g L⁻¹, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 3C). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o índice relativo de clorofila nas concentrações iguais a zero, 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ (Fig. 3C).

A pulverização foliar de Mn aumentou o rendimento quântico do fotossistema II (F_v / F_m) independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações de Mn iguais 0,59 e 0,64 g L⁻¹, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 3D). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o rendimento quântico do fotossistema II (F_v / F_m), nas pulverizações com calda, nas concentrações iguais a zero; 0,29; 0,58 e 0,87g L⁻¹ de Mn (Fig. 3D).

A pulverização foliar de Mn aumentou o conteúdo de fenóis totais independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações de Mn iguais a 0,49 e 0,56 g L⁻¹, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 3E). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o conteúdo de fenóis totais apenas nas concentrações de Mn iguais a zero; 0,29 e 0,58 g L⁻¹ (Fig. 3E).

A pulverização foliar de Mn diminuiu o índice de vazamento de eletrólito independente do uso de Si na calda, a partir das concentrações de 0,08 e 0,04 g L⁻¹ de Mn, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 3F). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, diminuiu o vazamento de eletrólitos celular apenas na concentração zero e 0,29 g L⁻¹ de Mn (Fig. 3F).

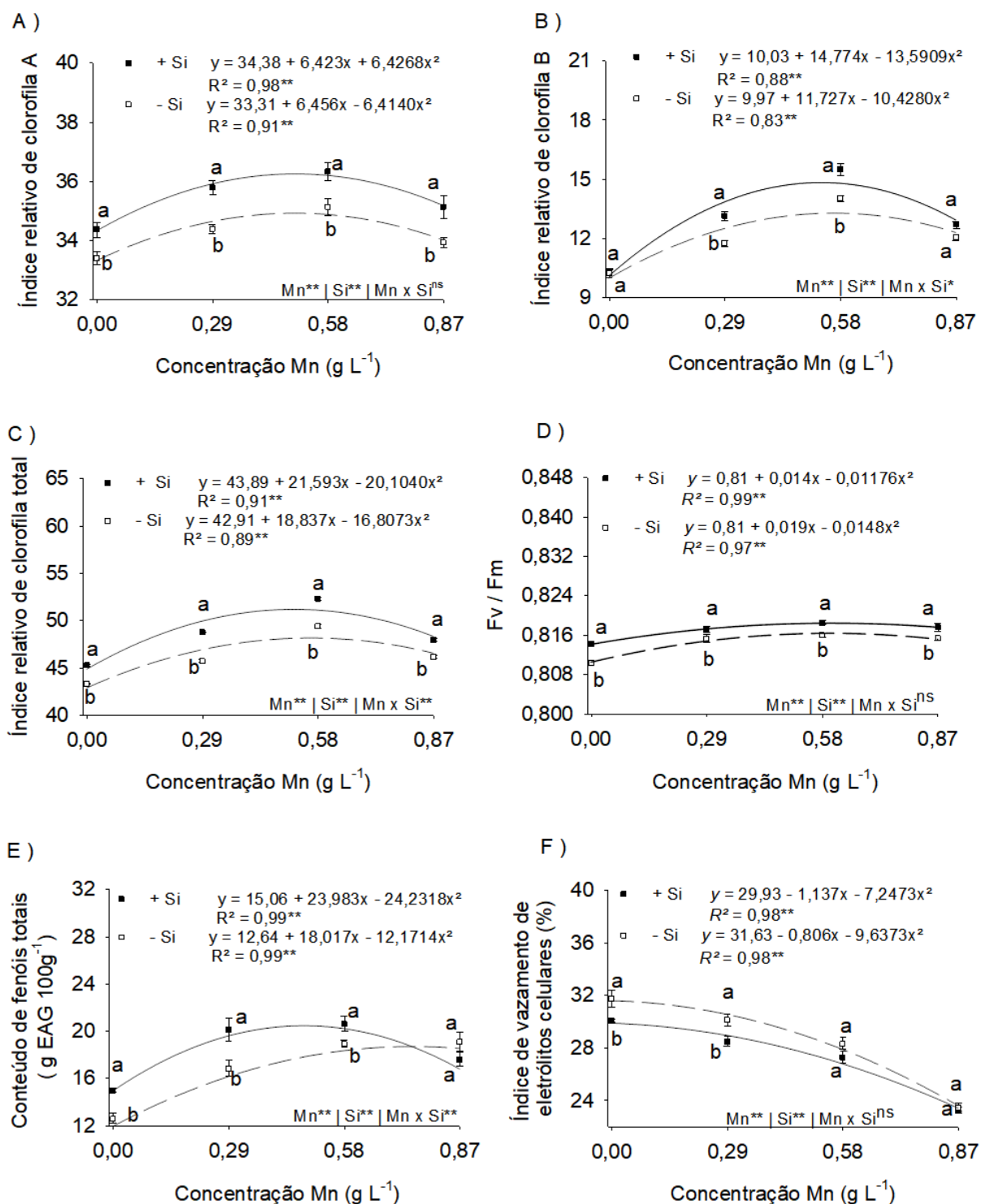


Figure 3 - Índice relativo de clorofila A (A), índice relativo de clorofila B (B), índice relativo de clorofila total (C), eficiência quântica do fotossistema II (PSII) (D), conteúdo fenólico total (E) e vazamento de eletrólitos celulares (E) de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês (Mn), na presença (+ Si) e na ausência de silício (- Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ^{ns} não significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM).

A pulverização foliar de Mn promoveu incremento, na altura de plantas dependendo do uso do Si, pois houve ajuste linear com o uso da calda sem adição de Si. Porém, na presença do elemento elemento benéfico, o ajuste foi quadrático atingindo o máximo na concentração do micronutriente igual $0,66 \text{ g L}^{-1}$ (Fig. 4A). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou a altura de plantas na concentração igual $0,29 \text{ g L}^{-1}$ de Mn (Fig. 4A).

A pulverização foliar de Mn promoveu incremento, no diâmetro do caule, independente do uso do Si, pois o ajuste foi linear com o uso da calda sem adição de Si, mas na presença do elemento elemento benéfico, o ajuste foi quadrático, atingindo o máximo na concentração do micronutriente igual $0,51 \text{ g L}^{-1}$ (Fig. 4B). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o diâmetro do caule nas concentrações iguais a zero, $0,29$ e $0,58$ de Mn (Fig. 4B).

A pulverização foliar de Mn promoveu incremento na área foliar dependendo do Si, pois houve ajuste linear com o uso da calda sem adição de Si, mas na presença do elemento benéfico, o ajuste foi quadrático, atingindo o máximo na concentração do micronutriente igual $0,88 \text{ g L}^{-1}$ (Fig. 4C). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o área foliar nas concentrações iguais a $0,29$; $0,58$ e $0,87 \text{ g L}^{-1}$ de Mn (Fig. 4C).

A pulverização foliar de Mn aumentou a massa seca da parte aérea independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações do micronutriente iguais $0,71$ e $0,89 \text{ g L}^{-1}$, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig 4D). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou a massa seca da parte aérea nas concentrações zero; $0,29$ e $0,58 \text{ g L}^{-1}$ de Mn (Fig. 4D).

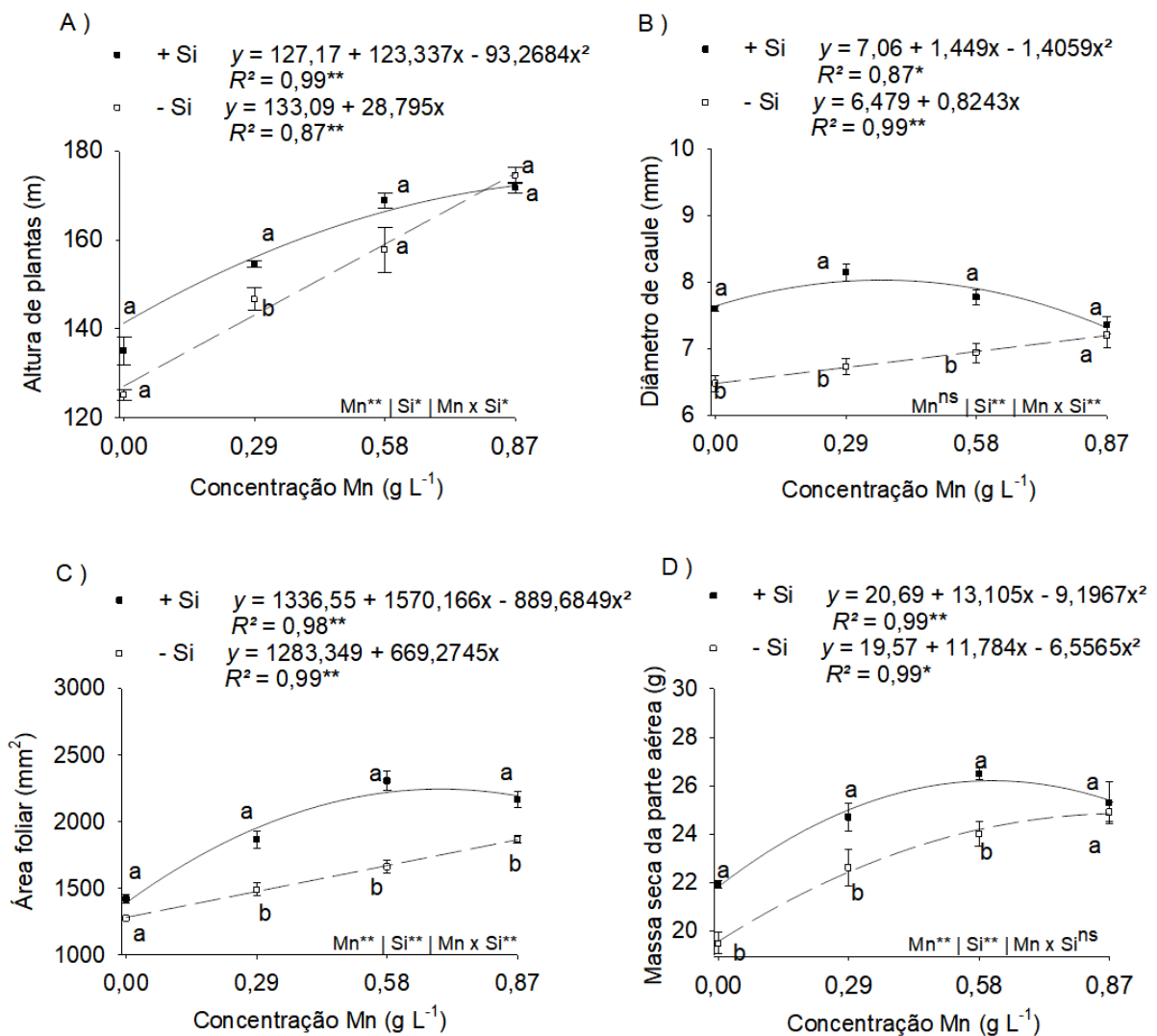


Figure 4 - Altura de plantas (A), diâmetro de caule (B), área foliar (C) e massa seca da parte aérea (D) de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês (Mn), na presença (+ Si) e na ausência de silício (- Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ns não significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM).

A pulverização foliar de Mn aumentou o número de grãos por planta independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações de Mn iguais 0,71 e 0,79 g L⁻¹, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 5A).

A pulverização foliar de Mn aumentou a produção de grãos independente do uso de Si na calda, atingindo o máximo, nas concentrações de Mn iguais 0,63 e 0,65

g L⁻¹, na presença e na ausência de Si, respectivamente (Fig. 5B). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou a produção de grãos nas concentrações iguais a 0,58 e 0,87 g L⁻¹ de Mn (Fig. 5B).

A pulverização foliar de Mn promoveu incremento no teor de proteína no grão dependendo do elemento benéfico, pois houve ajuste linear com uso da calda sem adição de Si, mas, na sua presença, o ajuste foi quadrático, atingindo o máximo na concentração do micronutriente igual 0,65 g L⁻¹ (Fig. 5C). O acréscimo de Si na calda, em relação à sua ausência, aumentou o teor de proteína no grão nas concentrações iguais a zero, 0,29 e 0,58 de Mn (Fig. 5C).

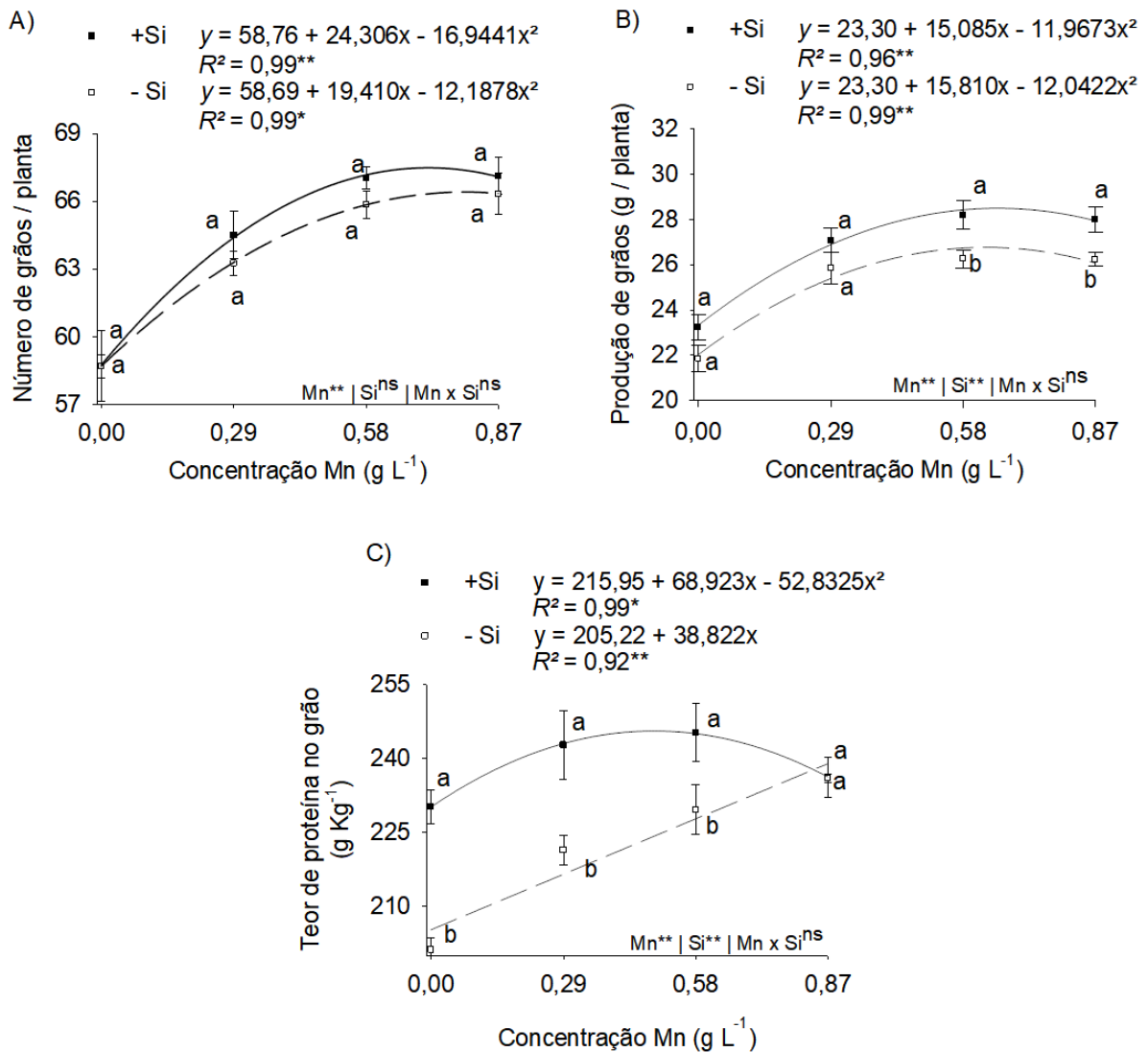


Figure 5 - Número de grãos (A), produção de grãos (B) e teor de proteína no grão de plantas de soja, em relação ao aumento das concentrações de manganês, (Mn) na presença (+ Si) e na ausência de silício (- Si). ** Significativo a 1% de probabilidade; * significativo a 5% de probabilidade e ns não significativo pelo teste de F. Letras diferentes na mesma concentração indicam diferença entre a presença e ausência de silício ($p < 0.05$ pelo Teste de Tukey). As barras representam o erro padrão da média (EPM).

5. DISCUSSÃO

Observou-se claramente o prejuízo biológico da deficiência de Mn, nas plantas de soja controle, que não receberam a pulverização foliar do micronutriente e do Si e cultivada em areia que recebeu solução nutritiva com omissão do micronutriente.

Esse micronutriente é importante, porque ativa a enzima RNA polimerase, que está envolvida na síntese de lipídeos, proteínas e multiplicação celular (Prado, 2020), afetando a constituição da membrana dos pigmentos (Gong et al., 2010) e a sua falta resultou em baixo índice relativo de clorofila (Fig. 3 ABC).

Associado a isso, a deficiência de Mn, nas plantas de soja, promoveu perda de energia, durante a transferência de elétrons, evidenciado pela baixa eficiência quântica do fotossistema II (Fig. 3D). A deficiência de Mn induz destruição dos cloroplastos e diminuição da concentração de clorofila, pois as funções do micronutriente estão ligadas à integridade das membranas dos cloroplastos (Schmidt et al., 2016).

Esse fato resulta em estresse na planta, dado o baixo conteúdo de antioxidantes como compostos fenólicos (Fig. 3E). Sendo assim, a biossíntese desse metabólito secundário fica comprometida sob deficiência de Mn e, por apresentarem alto índice de vazamentos de eletrólitos (Fig. 3F), pela inibição da reação de Hill, pode levar à formação de radicais livres que deveriam ser eliminados pela ação da enzima superóxido dismutase, que, em situações de deficiência de Mn, trabalham sob baixa eficiência (Reddi et al., 2009).

Essa consequência de fatos resultam em efeitos negativos em reações subsequentes, como: fotofosforilação, fixação do CO₂, redução do nitrito e do sulfato (Epstein e Bloom, 2006b), prejudicando o crescimento da planta, visto pelo baixo índice de área foliar (Fig. 4C e Fig. 8-9), massa seca da parte aérea (Fig. 4D e Fig. 7) e, conseqüentemente, tem-se baixa produção de grãos da cultura da soja (Fig. 5B e Fig. 10). Esses resultados, nas plantas controle, indicam que as plantas de soja deficientes de Mn são sensíveis ao estresse oxidativo que induz aos danos fisiológicos (Farzadfar et al., 2017), resultando em clorose internerval, nas folhas mais jovens, que são visíveis somente quando o desenvolvimento da planta está comprometido (Fig. 6).



Figure 6 - Imagem da folha trifoliada de plantas de soja com sintoma de deficiência de Mn que recebeu pulverização somente de água (ausência de Mn e Si) durante a condução do experimento.

Os prejuízos biológicos da deficiência de Mn, sem adição de Si, induziram sintomas, nas folhas das plantas de soja sem adição desse micronutriente, tendo folíolos com um fundo verde-claro e clorose mais acentuada entre as nervuras, fato já destacado por outros autores (Epstein e Bloom, 2006b ; Marschner, 2011 ; Prado, 2021) (Fig. 6 e Fig. 9). Um detalhe da clorose, nas pontas dos folíolos, chama a atenção, visto que pode ser indicativo de acúmulo de ureia (Fig. 9). Isso pode ocorrer, durante o principal processo de reassimilação do N, em que se tem hidrólise da arginina pela arginase e forma-se a ureia para ser hidrolisada, em uma reação dependente de Mn, formando amônia que, posteriormente, é incorporada a esqueletos de carbono, formando novos aminoácidos (Siddappa e Marathe, 2020).

Assim, evidencia-se a importância do Mn, para a ativação da urease (Park e Hausinger, 1996), havendo acúmulo da ureia que é tóxica no tecido, induzindo à clorose, na ponta das folhas (Fig. 9), fato pouco abordado nos trabalhos de diagnose visual na cultura, embora, segundo Siqueira et al. (2018), esse sintoma é semelhante à deficiência em Ni, pois ele é também ativador da urease.

Evidencia-se que a pulverização foliar de Mn junto com o Si, ao incrementar o acúmulo do elemento benéfico na planta, indica ser prática promissora para a sua nutrição (Fig. 2A e Fig. 2B), ainda que essa espécie seja classificada como não acumuladoras ou exclusoras de Si ($< 5 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) (Ma e Takahashi, 2002 ; Mitani, 2005), dada a baixa absorção radicular e transporte do elemento benéfico pelas enzimas Lsi 1 e Lsi 2 (Ma e Yamaji, 2015).

Essa boa absorção foliar de Si pela planta de soja pode ser resultado de ausência de reação do Si com o Mn em solução. Essa constatação se deve, provavelmente, pelo fato do uso da fonte do micronutriente na forma de quelato Mn-EDTA, em que pares de elétrons do Mn formam ligações coordenadas, na formação de um complexo com ligante orgânico hexadentado EDTA, portanto, evitando reação que poderia promover a polimerização do elemento benéfico. A fonte quelatada com Mn é eficiente e utilizada, com frequência, nos cultivos anuais em pulverizações foliares (Neocleous et al., 2020) e sua aplicação, em mistura com Si, foi eficiente no fornecimento dos dois elementos em poáceas (Oliveira et al., 2020). Logo a primeira hipótese pode ser aceita, pois o fornecimento de Si via pulverização foliar associado com Mn garante absorção adequada do elemento nas plantas de soja indicando compatibilidade.

A alta qualidade da calda beneficiou os efeitos da pulverização foliar de Mn, nas plantas de soja, independentemente da adição de Si na calda, sendo que diminuiu o estresse oxidativo, dado o aumento da eficiência quântica do fotossistema II (Fig. 3D), em virtude da diminuição do vazamento de eletrólitos (Fig. 3F), favorecendo as variáveis biométricas, como altura de planta (Fig. 4A), área foliar (Fig. 4B), produção de massa seca da parte aérea (Fig. 4C e Fig. 7), número de grãos (Fig. 5A e Fig. 10) e produção de grãos da cultura (Fig. 5B e Fig. 10).

Isso demonstra a importância da pulverização foliar de Mn, para a cultura da soja, fato que foi constatado por outros autores, indicando aumento da produção de grãos da cultura (Ohki et al., 1987 ; Gettier et al., 1985 ; Alt et al., 2018).

Observa-se que a máxima produção de grãos da oleaginosa ocorreu com a pulverização foliar com calda, na concentração próxima de $0,63$ a $0,65 \text{ g L}^{-1}$ de Mn, independente do Si na calda fornecida em quatro pulverizações. Esses valores ótimos da concentração de Mn na calda estão próximos à indicação de Gettier et al. (1985)

(0,56 g L⁻¹ de Mn), com uso de duas pulverizações e abaixo da indicação de Mann et al. (2002) (1 g L⁻¹), que realizaram três pulverizações nas plantas de soja.

Essa maior diferença de resultados da concentração de Mn ótima, para a cultura da soja, pode ser em razão do número e época das pulverizações, já que, no trabalho de Mann et al. (2002), as três aplicações foliares concentraram-se na fase vegetativa (V4, V8 e V10) e, neste trabalho, foram quatro pulverizações, favorecendo a fase vegetativa e reprodutiva (V6, V8, R1, R2). É possível que maior número de aplicações de Mn, em diferentes fases fenológicas da cultura, podem ser mais eficientes na correção da deficiência (Ohki et al., 1987) e, especialmente, possa diminuir a concentração ótima do micronutriente a ser pulverizado para a cultura.

Um outro aspecto importante à qualidade da produção da soja é o teor de proteína, um atributo essencial, para atender a dieta animal (Marques, 2018), fato evidenciado neste estudo, pois a pulverização foliar propiciou o aumento do teor de proteína nos grãos de soja (Fig. 5C), corroborando com os trabalhos de Mann et al., (2002), que ressaltam a importância de teores adequados de proteína nos grãos.

O benefício do Si adicionado na calda com Mn, na produção e no teor de proteína de grãos da cultura da soja, ficou favorecido pelo aumento do índice relativo de clorofila e da eficiência quântica do fotossistema II, em todas as concentrações de Mn estudadas. Há relatos que, na deficiência de Mn, o Si tem a capacidade de aumentar a eficiência fotossintética comprometida (Ali et al., 2020) e de melhorar redistribuição homogênea do micronutriente na folha (Hernandez-Apaolaza, 2014). Um outro efeito importante do Si seria no aumento da produção de antioxidante, como compostos fenólicos, que se destacam, especialmente, em plantas controle ou em que se emprega uma pulverização foliar de Mn insuficiente (0,29 g L⁻¹). Segundo Mendonça et al. (2013), pelo fato de que o Si promove incremento da atividade de enzimas peroxidases, polifenoloxidasas e fenilalanina amônia-liase com ação na rota metabólica de síntese do composto fenólico, esse fato ocorra..

Nessa perspectiva, a aplicação de Mn com o Si na calda foi responsável pela diminuição do vazamento de eletrólitos, comprovando a importância do Si, na atenuação do estresse oxidativo, em especial, em situação mais grave de deficiência de Mn e, em consequência, favorece o crescimento da planta, fatos que permitem aceitar a segunda hipótese deste trabalho. Assim, esse sinergismo do Mn e Si em

pulverização foliar, constatado em poáceas por Oliveira et al., (2020), confirma-se pela primeira vez em plantas de soja não acumuladoras do Si.

A pesquisa propõe uma nova estratégia, para suprir a demanda de Mn na cultura da soja, a partir da adubação foliar na concentração de $0,65 \text{ g L}^{-1}$ de Mn, podendo ser potencializada com a adição de Si ($0,63 \text{ g L}^{-1}$) na calda, a ser realizada em quatro pulverizações, favorecendo a sustentabilidade da cultura, em diversas regiões do mundo, dada a sensibilidade da oleaginosa à deficiência desse micronutriente.

A perspectiva futura é de que novas pesquisas, explorando a sinergia do Mn e Si via foliar, sejam realizadas, em outras espécies não acumuladoras de Si, pois esse estudo revelou que a absorção foliar do Si é relevante na oleaginosa, sendo alternativa pela limitação na absorção radicular do elemento e, especialmente, em transportá-lo para as folhas.

6. CONCLUSÃO

A pulverização foliar de Mn, na forma de quelato, combinado com Si, atenua os distúrbios fisiológicos referentes à deficiência desse micronutriente, em plantas de soja, por aumentar o índice relativo de clorofila; a eficiência quântica do fotossistema II; o conteúdo de compostos fenólicos totais e diminuir o índice de vazamento celular, propiciando incrementos na altura de plantas, área foliar, massa seca da parte aérea, número e produção de grãos e teor de proteína de grãos.

A composição da calda recomendada à aplicação, em plantas de soja, é a concentração de $0,65 \text{ g L}^{-1}$ de Mn, podendo ser potencializada com a adição de Si ($0,48 \text{ g L}^{-1}$) na calda a ser realizada em quatro pulverizações.

REFERÊNCIAS

Albrecht, A. J. P., Fausto, D. A., Albrecht, L. P., Migliavacca, R. A., Eckert, C. T., Victoria Filho, R (2009). Economic influences of the application of different managements, formulations and doses of Glyphosate on RR soybean. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. 13:507-23

Alejandro, S., Cailliatte, R., Alcon, C., Dirick, L., Domergue, F., Correia, D., Castaings, L., Briat, J. F., Mari, S., Curie, C (2017) . Intracellular distribution of manganese by the trans-golgi network transporter NRAMP2 is critical for photosynthesis and cellular Redox homeostasis. **The Plant Cell**. 29:3068-84.

Alejandro, S., Höller, S., Meier, B., Peiter, E. (2020) Manganese in plants: from acquisition to subcellular allocation. **Frontiers in Plant Science**. 11.

Ali, M. A. M., Ramezani, A., Far, S. M., Asilan, K. S., Moradi-Ghahderijani M., Jamian, S. S. (2013) Application of silicon ameliorates salinity stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences (IJACS)**. 6:1367-72.

Ali, N., Réthoré, E., Yvin, J. C., Hosseini, S. A. (2020) The Regulatory Role of Silicon in Mitigating Plant Nutritional Stresses. **Plants**. 9:1779

Alt, D., Ng, S. J., Grusenmeyer, J., Lindsey, L. E. (2018) Seed Yield and Quality of Transgenic High-Oleic and Conventional Soybean as Influenced by Foliar Manganese Application. **Crop Science**. 58:874-9.

Artyszak, A. (2018) Effect of Silicon Fertilization on Crop Yield Quantity and Quality—A Literature Review in Europe. **Plants**. 7:54.

Bataglia, O., Furlani, A., Teixeira, J. (1983) Métodos de análise química de plantas- Boletim técnico 78. Campinas: **Instituto Agronômico de Campinas (IAC)**; 56.

Bityutskii, N., Pavlovic, J., Yakkonen, K., Maksimović, V., Nikolic, M. (2014) Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of

metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant physiology and Biochemistry**. 74:205-11.

Blamey, F. P. C., Paterson, D. J., Walsh, A., Afshar, N., McKenna, B. A., Cheng, M., Tang, C., Horst, W. J., Menzies, N. W., Kopittke, P. M. (2018) Time-resolved X-ray fluorescence analysis of element distribution and concentration in living plants: An example using manganese toxicity in cowpea leaves. **Environmental and Experimental Botany**. 156:151-60.

Bloom, A. J., Lancaster, K. M. (2018) Manganese binding to Rubisco could drive a photorespiratory pathway that increases the energy efficiency of photosynthesis. **Nature Plants**. 4:414-22

Brunings, A. M., Datnoff, L. E., Ma, J. F., Mitani, N., Nagamura, Y., Rathinasabapathi, B., Kirst, M. (2009) Differential gene expression of rice in response to silicon and rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. **Annals of Applied Biology**. 155:161-70.

Buchelt, A. C., Teixeira, G. C. M., Oliveira, K. S., Rocha, A. M. S., Prado, R. M., Caione, G. (2020) Silicon Contribution Via Nutrient Solution in Forage Plants to Mitigate Nitrogen, Potassium, Calcium, Magnesium, and Sulfur Deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. 20:1532-48.

Campbell, L. C., Nable, R. O. (1998) Physiological Functions of Manganese in Plants. Manganese in Soils and Plants. **Springer Netherlands**. 139-54.

Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, J. G., Reynolds, O., Ma, J. G., Kronzucker, H. J., Bélanger, R. R. (2019) The controversies of silicon's role in plant biology. **New Phytologist**. 221:67-85.

Debona, D., Rodrigues, F. A., Datnoff, L. E. (2017) Silicon's Role in Abiotic and Biotic Plant Stresses. **Annual Review of Phytopathology**. 55:85-107.

Dionisio-Sese, M. L., Science, S. T. (1998) Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**. 135:1-9.

Dragisic-Maksimovic, J., Mojovic, M., Maksimovic, V. (2016) Silicon facilitates manganese phytoextraction by cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Zaštita materijala**. 57:424-9.

Dragisic, J. M., Maksimovic, V. (2020) Silicon alleviated manganese toxicity in cucumber by cell wall compartmentation. **EGU General Assembly Conference Abstracts**. 5091.

Enderson, J. T., Mallarino, A. P., Haq, M. U. (2015) Soybean yield response to foliar-applied micronutrients and relationships among soil and tissue tests. **Wiley Online Library**. 107:2143-61.

Epstein, E., Bloom, A. (2006a) Componentes Inorgânicos de Plantas. *Nutrição Mineral de Plantas: Princípios e Perspectivas*. 2^o edição. Londrina - Paraná: **Editora Planta**; 403.

Epstein, E., Bloom, A. (2006b) **Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade**. 118.2: 1-24.

Eyster, C., Brown, T. E., Tanner, H. A., Hood, S. L. (1958) Manganese Requirement with Respect to Growth, Hill Reaction and Photosynthesis. **Plant Physiology**. 33:235.

Fageria, N. K., Barbosa Filho, M. P., Moreira, A., Guimarães, C.M. (2009) Foliar Fertilization of Crop Plants. **Journal of Plant Nutrition**. 32:1044-64.

Fageria, V. D. (2001) Nutrient interactions in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**. 27.8:1269-1290.

Farzadfar, S. , Zarinkamar, F., Hojati, M. (2017) Magnesium and manganese affect photosynthesis, essential oil composition and phenolic compounds of *Tanacetum parthenium*. **Plant Physiology and Biochemistry**. 112:207-17.

Felisberto, G. (2018) **Silício na mitigação de estresse por deficiência de zinco em plantas de arroz e soja**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Dissertação de Mestrado). 64.

Gettier, S. W., Martens, D. C., Brumback, T. B. (1985) Timing of foliar manganese application for correction of manganese deficiency in soybean. **Agronomy Journal**. 77:627-30.

Gong, X., Wang, Y., Liu, C., Wang, S., Zhao, X., Zhou, M., Li, N., Lu, Y., Hong, F. (2010) Effects of manganese deficiency on spectral characteristics and oxygen evolution in maize chloroplasts. **Biological Trace Element Research**. 136:372-82.

Hernandez-Apaolaza, L. (2014) Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. **Plant**. 240:447-58.

Hoagland, D. R., Arnon, D. I. (1950) The water-culture method for growing plants without soil. **Circular. California Agricultural Experiment Station**. 347-360.

Hodson, M., White, P., Mead, A., Broadley, M. (2005) Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of Botany**. 96:1027-46

Hussain, S., Mumtaz, M., Manzoor, S., Shuxian, L., Ahmed, I., Skalicky, M., Brestic, M., Rastogi, A., Ulhassan, Z., Shafiq, I., Allakhverdiev, S. I., Khurshid, H., Yang, W., Liu, W. (2021a) Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**. 159:43-52.

Hussain, S., Shuxian, L., Mumtaz, M., Shafiq, I., Iqbal, N., Brestic, M., Shoaib, M., Sisi, Q., Li, W., Mei, X., Bing, C., Zivcak, M., Rastogi, A., Skalicky, M., Hejnak, V., Weiguo, L., Wenyu, Y. (2021a) Foliar application of silicon improves stem strength under low light stress by regulating lignin biosynthesis genes in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). **Journal of Hazardous Materials**. 401:123256.

Kim, Y. H., Khan, A. L., Waqas, M., Lee, I. J. (2017) Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: A review. **Frontiers in Plant Science**. 8:510.

Kirchhoff, H. (2014) Structural changes of the thylakoid membrane network induced by high light stress in plant chloroplasts. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**. 369: 1640. 20130-225.

Korndörfer, G. H., Pereira, H. S., Nolla, A. (2004) **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Boletim Técnico – Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Kraska, J. E., Breitenbeck, G. A., Simple, R. (2010) Method for Quantifying Silicon in Plant Tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 41:2075-85.

Li, C., Wang, P., Menzies, N. W., Lombi, E. (2017) Effects of changes in leaf properties mediated by methyl jasmonate (MeJA) on foliar absorption of Zn, Mn and Fe. **Annals of Botany**. 120:405-15.

Li, P., Song, A., Li, Z., Fan, F., Liang, Y. (2012) Silicon ameliorates manganese toxicity by regulating manganese transport and antioxidant reactions in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil**. 354:407-19.

Liang, X., Wang, H., Hu, Y., Mao, L., Sun, L., Dong, T., Nan, W., Bi, Y (2014). Silicon does not mitigate cell death in cultured tobacco BY-2 cells subjected to salinity without ethylene emission. **Plant Cell Reports**. 34:331-43.

Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y. (2007) Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**. 147:422-8.

Lichtenthaler, H. K., Buschmann, C., Knapp, M. (2005) How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**. 43:379-93.

Lindsay W. (1979) **Chemical equilibria in soils**. Editora John Wiley and Sons. 449.

Ling, G., Jiang, X., Yang S., Huang, Y., Zhao, Z., Gu, M., Li, X. (2016) Silicon alleviates manganese toxicity in sugarcane. **Southwest China Journal Agricultural Science**. 29:1639-43.

Loecker, J. L., Nelson, N. O., Gordon, W. B. (2010) Manganese response in conventional and glyphosate resistant soybean. **Wiley Online Library**. 102:606-11.

Long, L., Pedas, P. R., Kristensen, R. K., Schulze, W. X., Husted, S., Zhang, G., Schjoerring, J. K., Yuan, L. (2020) High light intensity aggravates latent manganese deficiency in maize. **Journal of Experimental Botany**. 71:6116-27.

Lopes AS. (1999) **Micronutrientes: Filosofias de Aplicação e Eficiência Agrônômica**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos. 1-64.

Ma, J., Takahashi, E. (2002) **Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan**. Elsevier. 15-30.

Ma, J. F., Yamaji, N. (2015) A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**. 20:435-42.

Malavolta, E. (2006) Manual de nutrição mineral de plantas. **Agrônômica Ceres**.

Mann, E. N., Resende, P. M. D., Mann, R. S., Carvalho, J. G. (2002) Effect of manganese application on yield and seed quality of soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 37:1752-64.

Marques, C. L. (2018) **Controle da qualidade na produção de ração animal**. Coimbra - Portugal: Escola Superior de Agronomia de Coimbra (Dissertação de Mestrado). 75.

Marschner H. (2011) **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Elsevier.

Mascarenhas, H. A. A., Esteves, J. A. S., Wutke, E. B., Gallo, P. B. (2014) Micronutrientes em soja no estado de São Paulo. **Revista Nucleus**. 11:1. 323-342.

Miao, B. H., Han, X. G., Zhang, W. H. (2010) The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Annals of Botany**.105:967-73.

Millaleo, R., Reyes-Díaz, M., Ivanov, A. G., Mora, M. L., Alberdi, M. (2010) Manganese as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**.10:476-94.

Mills, H. A., Jones, J. J. (1996) **Manual de análise de plantas II: Um guia prático de amostragem, preparação, análise e interpretação**. 4:3.45-80.

Mitani, N. Uptake system of silicon in different plant species. (2005) **Journal of Experimental Botany**. 56:1255-61.

Mocellin, R. S. P. (2004) Princípios da Adubação Foliar: Coletânea de dados e revisão bibliográfica. Canoas - RS: **Omega Fertilizantes**.

Monreal, C. M., Derosa, M., Mallubhotla, S. C., Bindraban, P. S., Dimkpa, C. (2016) Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. **Biology and Fertility of Soils**. 52:423-37.

Mousavi, S. R., Shahsavari, M., Rezaei, M. (2011) A general overview on manganese (Mn) importance for crops production. **Australian Journal Basic and Applied Science**. 5:9. 1799-1803.

Nava, I. A., Gonçalves, A. C., Schwantes, D., Strey, L., Roweder, F.A., Sousa, R. F. B. (2012) Efeitos da fertilização foliar com manganês em soja transgênica cultivada no inverno manejada com glifosato. **Revista Recursos Rurais**. 8.

Neocleous, D., Nikolaou, G., Ntatsi, G., Savvas, D. (2020) Impact of Chelated or Inorganic Manganese and Zinc Applications in Closed Hydroponic Bean Crops on Growth, Yield, Photosynthesis, and Nutrient Uptake. **Agronomy**. 10:881.

Niu, J., Liu, C., Huang, M., Liu, K., Yan, D. (2020) Effects of Foliar Fertilization: a Review of Current Status and Future Perspectives. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**.1-15.

Nogueira, M. A., Cardoso, E. J. B. N. (2002) Microbial interactions on manganese availability and uptake by soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 37:1605-12.

Ohki, K., Boswell, F. C., Parker, M. B., Shuman, L. M., Wilson, D. O., Ohki, K., Boswell, F. C., Parker, M. B., Shuman, L. M., Wilson, D. O. (1987) Foliar manganese application to soybeans. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. 18:243-53.

Oliveira, J. A. O. D., Malavolta, E., Cabral, C. P. (2000) Efeitos do manganês sobre a soja cultivada em solo de cerrado do triângulo mineiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. 35:1629-36.

Oliveira Junior, A., Castro, C., Pereira, L., Domingos, C. S. (2016) Estádios fenológicos e marcha de absorção de nutrientes da soja. **Embrapa Soja –Fôlder / Folheto / Cartilha (INFOTECA-E)**.

Oliveira, K. S. (2019) **Pulverização foliar de manganês com adição de silício é viável para plantas de milho e de sorgo**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Dissertação de Mestrado. Jaboticabal - São Paulo. 1-56.

Oliveira, K. S., Prado, R. P., Guedes, V. H. F. (2020) Leaf Spraying of Manganese with Silicon Addition Is Agronomically Viable for Corn and Sorghum Plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. 20:872-80.

Oliveira, R. L. L., Mello Prado, R., Felisberto, G., Checchio, M. V., Gratão, P. L. (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**.19:524-34.

Papadakis, I. E., Giannakoula, A., Therios, I. N. (2007) Mn-induced changes in leaf structure and chloroplast ultrastructure of *Citrus volkameriana* (L.) plants. **Journal of Plant Physiology**. 164:100-3.

Park, I. S., Hausinger, R. P. (1996) Metal ion interactions with urease and ureD-urease apoproteins. **Biochemistry**. 35:5345-52.

Peck, T. R. (1979) Plant analysis for production agriculture. **Soil Plant Analysis Workshop**. 1-15.

Pinto, A. S. (2012) **Adubação com manganês em soja: efeitos no solo e na planta**. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Dissertação de Mestrado). 1-45.

Prado, R. M., Felisberto, G., Flores, R. A. (2019) Viabilidade técnica da aplicação foliar de silício em culturas. **Nutrição e Adubação de Grandes Culturas no Cerrado**. 1º. Goiânia: Gráfica da UFG. 97-138.

Prado, R. M. (2020). **Nutrição de plantas**. 2^{ed}. São Paulo: Editora UNESP. 407.

Prado, R. M. (2021) Mineral nutrition of tropical plants. **Springer**. 392.

Quast, D. G. (1966) Determinação e estudo da quantidade e qualidade da proteína do grão de milho (*Zea mays* L.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira** - EMBRAPA. 1:1. 225-232.

Randall, G. W., Schulte, E. E, Corey, R. B. (1975) Effect of Soil and Foliar-applied Manganese on the Micronutrient Content and Yield of Soybeans. **Agronomy Journal**. 67:502-7.

Reddi, A. R., Jensen, L. T, Naranuntarat, A. (2009) The overlapping roles of manganese and Cu/Zn SOD in oxidative stress protection. **Free Radical Biology e Medicine**. 46:154.

Roose, J. L., Frankel, L. K., Manjula, M. P., Bricker, T. M. (2016) The extrinsic proteins of photosystem II: update. **Plant**. 243:889-908.

Saidi, M. N., Jbir, R., Ghorbel, I., Namsi, A., Drira, N. (2012) 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**. 50:1-7.

Schmidt, S. B., Persson, D. P., Powikrowska, M., Frydenvang, J., Schjoerring, J. K., Jensen, P. E., Husted, S. (2015) Metal binding in photosystem II super- and subcomplexes from barley thylakoids. **Plant Physiology**. 4:1490-502.

Schmidt, S. B., Jensen, P. E., Husted S. (2016) Manganese deficiency in plants: the impact on photosystem II. **Trends in Plant Science**. 21:622-32.

Schmidt, S. B., Pedas, P., Laursen, K. H., Schjoerring, J. K., Husted, S. (2013) Latent manganese deficiency in barley can be diagnosed and remediated on the basis of chlorophyll a fluorescence measurements. **Plant and Soil**. 372:417-29.

Siddappa, S., Marathe, G. K. (2020) What we know about plant arginases? **Plant Physiology and Biochemistry**. 156:600-10.

Silverberg, J., Young, R. D., Hoffmeister, G. (1972) Preparation of fertilizers containing micronutrients. **Micronutrients in Agriculture**. 74:3. 735-741.

Simpson, D. J., Robinson, S. P. (1984) Freeze-Fracture Ultrastructure of Thylakoid Membranes in Chloroplasts from Manganese-Deficient Plants. **Plant Physiology**. 1984;74:735-41.

Singleton, V. L., Rossi, J. A. (1965) Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**. 16:144-58.

Siqueira, F. D., Wurr, R. B., Rodrigues, R. A., Barros, R. F., Soares, C. T., Schulze, J., Carbone, C. M. A., Guimarães, G. L. R. (2018) Hidden nickel deficiency? Nickel fertilization via soil improves nitrogen metabolism and grain yield in soybean genotypes. **Frontiers in plant Science**. 9: 614.

Staut, L. A. (2007) Adubação foliar com nutrientes na cultura da soja. **Embrapa Agropecuária Oeste-Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E)**, 2007.

Teixeira, G. C. M., Mello, P. R., Rocha, A. M. S., Santos, L. C. N., Santos, S. M. M., Gratão, P. L., Fernandes, C. (2020) Silicon in Pre-sprouted Sugarcane Seedlings Mitigates the Effects of Water Deficit After Transplanting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**.20:3. 849-859.

Trembath-Reichert, E., Wilson, J. P., Mcglynn, S. E., Fischer, W. W. (2015) Four hundred million years of silica biomineralization in land plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**.112:5449-54.

Vega, I., Nikolic, M., Pontigo, S., Godoy, K., Mora, M. L. L., Cartes, P. (2019) Silicon Improves the Production of High Antioxidant or Structural Phenolic Compounds in Barley Cultivars under Aluminum Stress. **Agronomy**. 9:388.

Veloso, C. A. C., Muraoka, T., Malavolta, E. (1995) Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira do reino (*Piper nigrum* L.). **Scientia Agricola**. 5:376-83.

Wallace, A. (1963) Role of chelating agents on the availability of nutrients to plants. **Wiley Online Library**. 27: 2. 176-179.

APÊNDICE

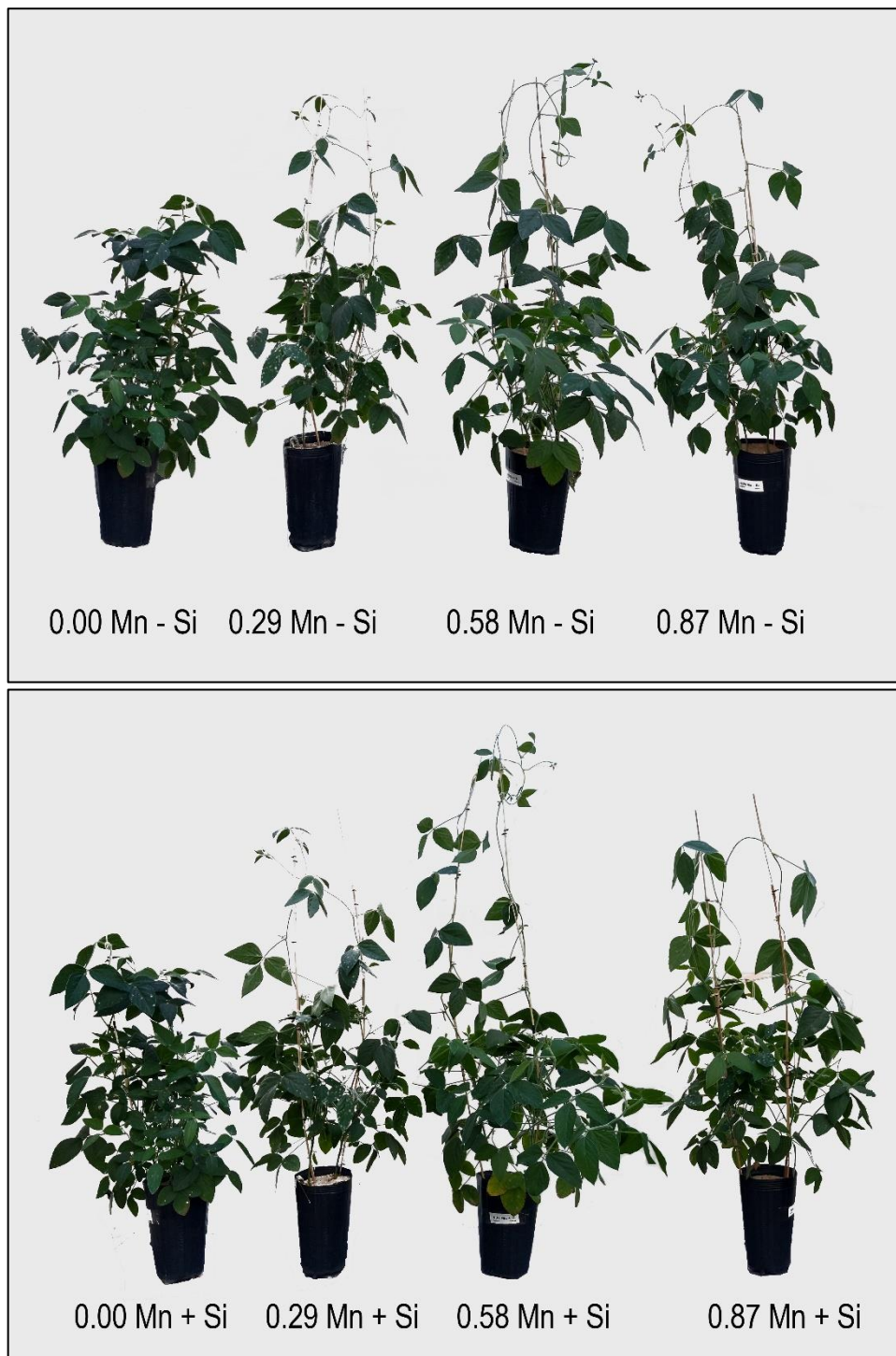


Figure 7 - Imagens das plantas de soja, nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29, 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹), realizadas durante o período de condução do experimento.

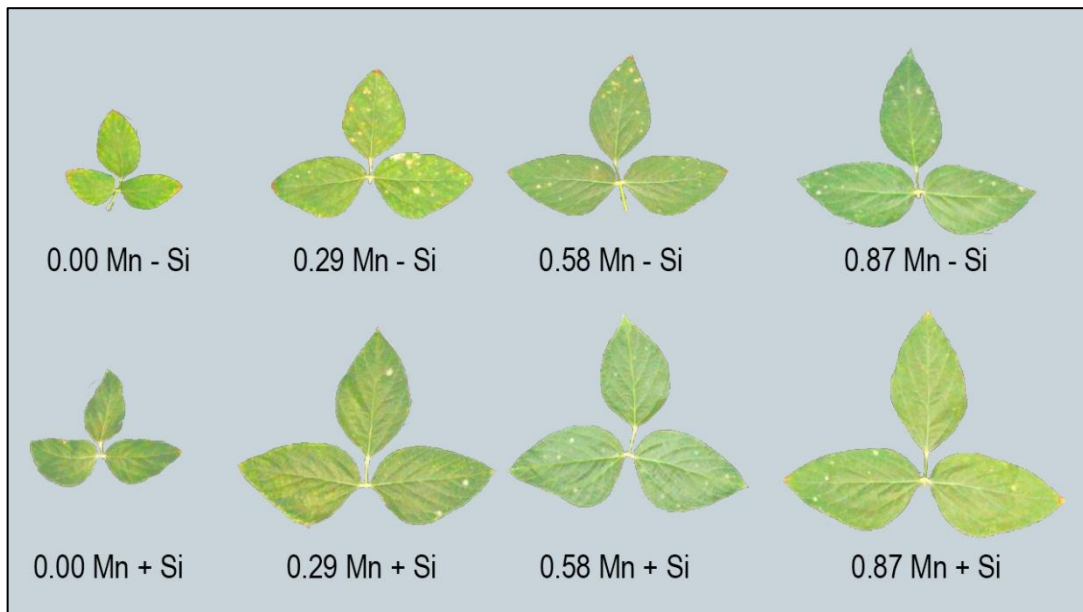


Figure 8 - Imagens das plantas de soja, nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29, 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹), realizadas durante o período de condução do experimento.

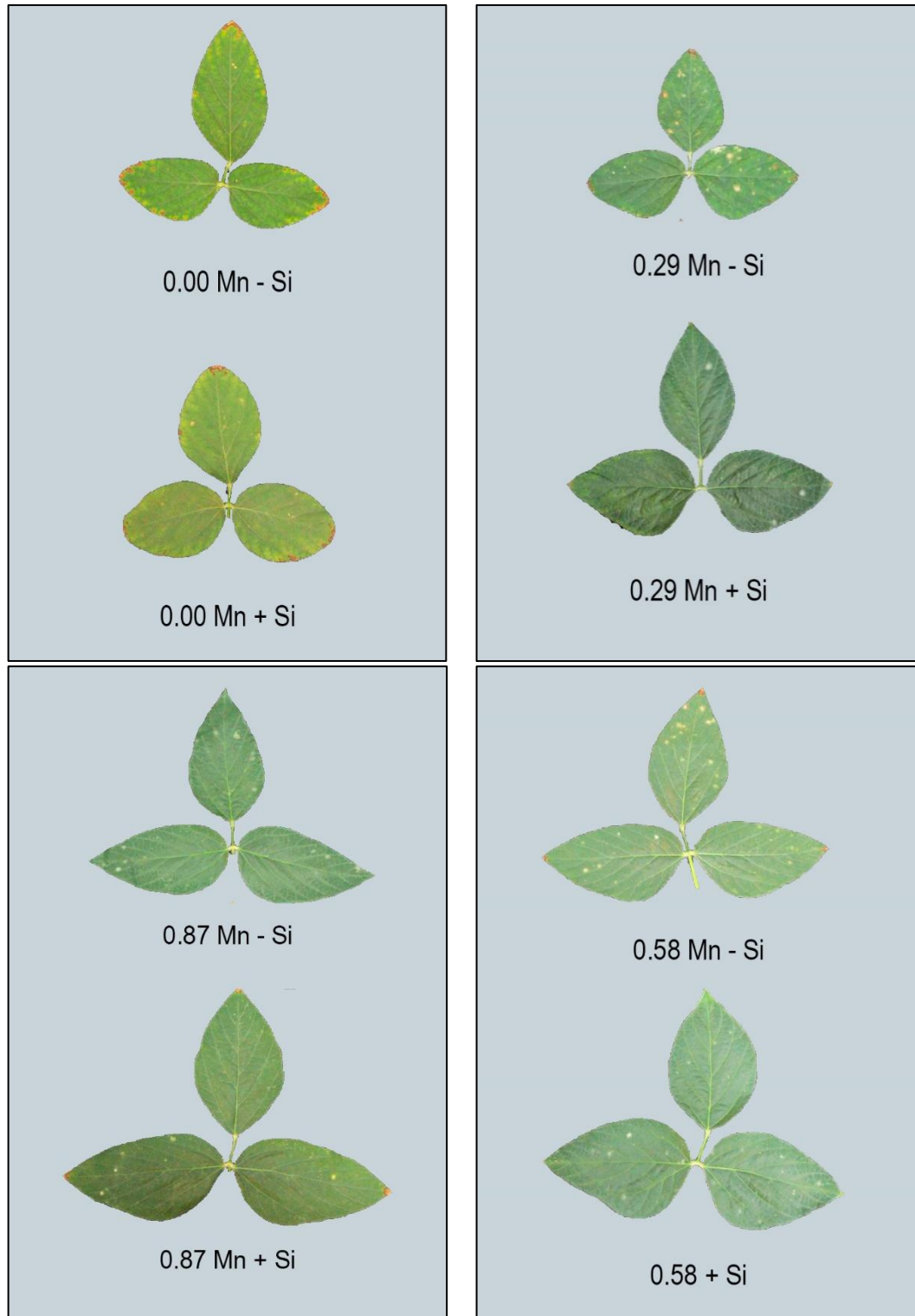


Figure 9 - Imagens trifólios de plantas de soja, nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29, 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹), realizadas durante o período de condução do experimento.

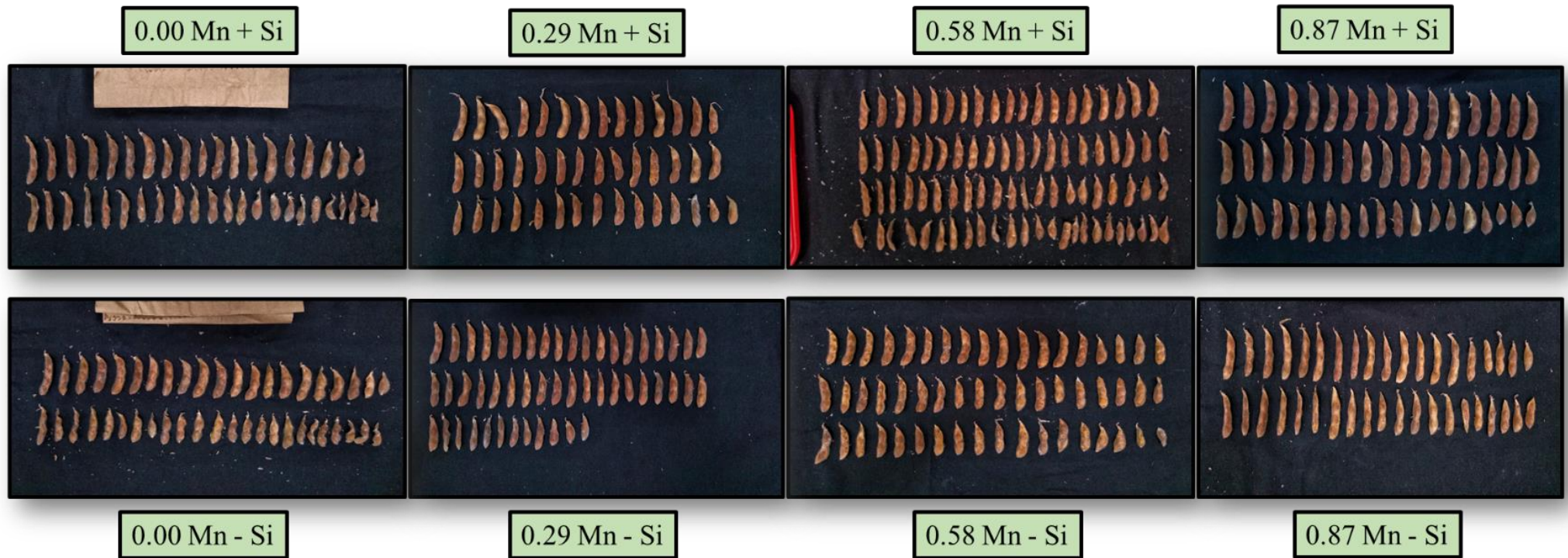


Figure 10 - Imagens de vagens de plantas de soja, nas concentrações Mn 0; 0,29; 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na ausência e 0; 0,29, 0,58 e 0,87 g L⁻¹ na presença de Si (0,48 g L⁻¹), realizadas durante o período de condução do experimento.