

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

KAROLYNNE PEIXOTO DE MELO NASCIMENTO

**RESPOSTA DE PLANTAS DE MILHO (*Zea mays* L.) A
DIFERENTES DOSES E FONTES DE SILÍCIO**

RECIFE

2024

Karolynne Peixoto de Melo Nascimento
Engenheira Agrônoma

Resposta de plantas de milho (*Zea mays* L.) a diferentes doses e fontes silício

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo.

Orientador:

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento

Coorientadores:

Profa. Dra. Caroline Miranda Biondi

Dra. Simone Lins Aparecida da Silva

Recife

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

N244r Nascimento, Karolynne Peixoto de Melo.
Resposta de plantas de milho (*Zea mays L.*) a diferentes doses e fontes de silício / Karolynne Peixoto de Melo Nascimento. – Recife, 2024.
58 f.

Orientador(a): Clístenes Williams Araújo do Nascimento.
Co-orientador(a): Caroline Miranda Biondi.
Co-orientador(a): Simone Lins Aparecida da Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências.

1. Silício. 2. Nutrição. 3. Produtividade. 4. Solo I. Nascimento, Clístenes Williams Araújo do, orient. II. Biondi, Caroline Miranda, coorient. III. Silva, Simone Lins Aparecida da, coorient. IV. Título

CDD 631.4

KAROLYNNE PEIXOTO DE MELO NASCIMENTO

Resposta de plantas de milho (*Zea mays* L.) a diferentes doses e fontes de silício

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo.

Aprovada em 30 de abril de 2024

Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Airon José da Silva

Universidade Federal de Sergipe

Prof. Dr. Leilson Costa Grangeiro

Universidade Federal Rural do Semi-Árido

*À Deus, acima de tudo, a
minha família e amigos, em
especial aos meus pais, minhas
irmãs e Giórgia, por acreditarem
no meu potencial, por toda força,
compreensão e amor. DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, primeiramente, por me colocar no caminho certo, por fazer com que acredite que no final tudo valerá a pena, por me abençoar e me proteger.

Aos meus pais, Eliane e Severino, por estarem sempre me apoiando, por todo amor, dedicação, por me mostrarem que sem estudo nada somos, por me fazerem querer ter um futuro melhor.

As minhas irmãs Kamille e Letícia, pelo apoio, compreensão, amor, por me mostrarem que um dia tudo vai ter o seu devido retorno, e por serem um dos motivos por toda a luta nessa caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Clístenes Williams Araújo do Nascimento, por acreditar no meu potencial, por ser compreensível, pela dedicação e incentivo. Todo esse apoio me instrui a seguir um ótimo caminho profissional. É admirável sua paixão pela ciência, o Brasil precisa de pesquisadores como o senhor. Minha gratidão por todos os conhecimentos compartilhados.

À FACEPE pela concessão de bolsa de estudo, é imprescindível todo o suporte para se fazer ciência de qualidade. Fica meu agradecimento.

Aos professores e professoras do PPG Ciência do solo da UFRPE, por todos os conhecimentos compartilhados.

Às minhas coorientadoras, Profa. Dra. Caroline Biondi por toda contribuição no meu crescimento científico e por todo carinho de sempre. À Dra. Simone Lins por toda ajuda nessa jornada, por todas contribuições científicas e por todo incentivo de sempre. Vocês estão no meu coração.

Ao Prof. Dr. Airon José da Silva e o Prof. Dr. Leilson Costa Grangeiro por aceitarem compor a banca examinadora desse trabalho. Sou grato pelo tempo e dedicação nas contribuições.

À Venâncio, Taciana, Jô, Raul, Rafael, todos os integrantes do grupo de pesquisa do Grupo de Química Ambiental de Solos (GQAS), pelas discussões científicas, e por toda ajuda ao longo do trabalho. Fica meu agradecimento.

À Franklone por sempre estar disponível para ajudar, sou grata por todo suporte científico, o processo se torna mais leve com pessoas como você.

Ao Dr. Fernando Bruno. Obrigado pelo suporte científico, pela ajuda em um momento muito importante para realização desse trabalho.

À Giórgia Sátiro, por sempre estar do meu lado, por me ajudar em todos os dias, sejam eles difíceis ou fáceis, por todos os ensinamentos, conselhos, por todos os momentos de alegria, por fazer que o processo ser mais leve. Ter você ao meu lado nessa jornada foi imprescindível para que tudo isso acontecesse.

Aos meus amigos que adquiri ao longo da pós-graduação, em especial Vitória Brito, Verônica Leal, Pâmela Sena, Cícero Aparecido (Nino), Wellyngton Heynrich, Jakson Nascimento, essa jornada me trouxe pessoas como vocês que quero levar para vida, agradeço por todo suporte, por todos os momentos que compartilhamos e por toda ajuda.

Aos meus grandes amigos Camila Alencar, Andrea Batista, Guilherme Belarmino, Joelma Silva, Lilian Daniele, por todo carinho, apoio e amor em todos os momentos dessa jornada.

À Universidade Federal Rural do Pernambuco, pela acolhida e contribuição nessa formação.

Á todos que contribuíram direta ou indiretamente nessa jornada durante os 2 anos, muito obrigada! Vocês também fazem parte dessa conquista.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

Resposta de plantas de milho (*Zea mays* L.) a diferentes doses e fontes de silício

RESUMO

O silício (Si) é considerado um elemento benéfico às plantas, pois proporciona aumento da produtividade, da qualidade e do rendimento das culturas, resistência a estresses bióticos e abióticos e melhoria da disponibilidade e assimilação de nutrientes. Conhecer os teores de Si solúvel e total em fertilizantes líquidos e sólidos é essencial para o sucesso da fertilização. No Brasil, há necessidade de mais estudos avaliando diferentes fontes de Si para condições diversas de solos e de culturas. O objetivo do trabalho foi avaliar o crescimento de planta de milho, e os teores de nutrientes na planta e no solo, em função da aplicação de diferentes fontes e doses de silício. O delineamento experimental foi em blocos casualizados composto por cinco tratamentos: 4 doses das quatro fontes de Si aplicadas no solo, com milho em casa de vegetação (100, 300, 600 e 1000 kg ha⁻¹) e um tratamento adicional sem aplicação de fertilizantes. A dose 1000 kg ha⁻¹ dos fertilizantes SC e AGRO promoveu um incremento de 12% na disponibilidade de Si no solo. AGRI não apresentou diferença significativa entre o tratamento testemunha e à aplicação das doses. Nos solos, o pH decresceu para 6,2 nas doses mais elevadas de silício. Os teores de nutrientes no solo (P, Mg, Fe, Mn, B e Zn) aumentaram com as doses dos fertilizantes, B foi o único nutriente que diferiu significativamente entre os fertilizantes, o AGRO e AGRI apresentaram de maneira mais expressiva aumento nas concentrações quando comparado com outras fontes. Na parte aérea e raiz das plantas de milho, a aplicação de fertilizantes silicatados no solo promoveu aumento nas concentrações de Si, o que demonstra o potencial dos fertilizantes para fornecer o elemento. Todos os parâmetros de crescimento aumentaram significativamente todos os fertilizantes. Os teores de nutrientes nas plantas (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn e B) aumentaram, com incremento das fontes. Os resultados mostraram que os fertilizantes SC, TD, AGRO e AGRI atuam como boas fontes de Si. A dose 600 kg ha⁻¹ do fertilizante AGRO mostrou ser agronomicamente mais viável, pelo efeito positivo nas características biométricas, acúmulo de Si e nutrição de plantas de milho.

Palavras-chave: Silício. Nutrição. Produtividade. Solo.

Corn plants (*Zea mays* L.) response to different doses and sources of silicon

ABSTRACT

Silicon (Si) is considered a beneficial element for plants, as it contributes to increased productivity, crop quality, and yield, as well as resistance to biotic and abiotic stresses. It also improves nutrient availability and assimilation. Understanding the levels of soluble and total Si in liquid and solid fertilizers is essential for successful fertilization. In Brazil, there is a need for more studies evaluating different Si sources under various soil and crop conditions. The objective of this study was to assess maize plant growth and nutrient levels in both plants and soil based on the application of different Si sources and doses. The experimental design consisted of randomized blocks with five treatments: four doses of Si sources applied to the soil (100, 300, 600, and 1000 kg ha⁻¹) and an additional treatment without fertilizer application. The 1000 kg ha⁻¹ dose of SC and AGRO fertilizers led to a 12% increase in Si availability in the soil. AGRI did not significantly differ from the control treatment or the applied doses. In the soil, pH decreased to 6.2 at higher silicon doses. Nutrient levels in the soil (P, Mg, Fe, Mn, B, and Zn) increased with fertilizer doses, with B being the only nutrient that significantly differed among the fertilizers. AGRO and AGRI showed more pronounced increases in concentrations compared to other sources. In the aboveground and root parts of maize plants, silicate fertilizers applied to the soil increased Si concentrations, demonstrating their potential for supplying this element. All growth parameters significantly improved with all fertilizers. Nutrient levels in the plants (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, and B) increased with source increments. Our results highlight the importance of Si fertilization for maize production. In the aboveground and root parts of maize plants, the application of silicate fertilizers to the soil increased Si concentrations, demonstrating the potential of these fertilizers to supply the element. All growth parameters significantly improved with all fertilizers. Nutrient levels in the plants (N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn, and B) increased with source increments. The results showed that SC, TD, AGRO, and AGRI fertilizers act as good Si sources. The 600 kg ha⁻¹ dose of AGRO fertilizer proved to be more agronomically viable due to its positive effects on biometric characteristics, Si accumulation, and maize plant nutrition.

Keywords: Silicon. Nutrition. Productivity. Soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Silício no solo.....	27
Figura 2 – pH, cálcio, fósforo e manganês disponível no solo.....	29
Figura 3 – Boro disponível no solo adubado com silicato de cálcio, terra diatomácea, agrosilício e agrisilício.....	30
Figura 4 – Silício na parte aérea e nas raízes.....	34
Figura 5 – Biometria e biomassa da parte aérea e das raízes das plantas de milho adubada com doses crescentes de fertilizantes silicatados	36
Figura 6 – Macronutrientes na parte aérea das plantas de milho adubada com doses crescentes de fertilizantes silicatados.....	38
Figura 7 – Micronutrientes na parte aérea das plantas de milho adubada com doses crescentes de fertilizantes silicatados.....	41
Figura 8 – Macronutrientes nas raízes das plantas de milho adubada com doses crescentes de fertilizantes silicatados.....	43
Figura 9 – Micronutrientes nas raízes das plantas de milho adubada com doses crescentes de fertilizantes silicatados.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físicas e químicas do solo utilizados nos experimentos	22
Tabela 2 – Caracterização química dos fertilizantes silicatados	23
Tabela 3 – Teores médios de macro e micronutrientes no solo cultivados com milho em solo tratados com calagem e fertilizante silicatados.....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Hipóteses.....	14
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Silício em solos e plantas.....	15
2.2 Fertilizantes silicatados.....	16
2.3 Relação silício e respostas de plantas	18
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 Montagem e condução do experimento	20
3.2 Coletas de dados de biometria	22
3.3 Coletas das plantas e do solo	22
3.4 Análise de Si em solo e planta.....	22
3.5 Análises no solo	23
3.6 Determinação de nutrientes nas plantas.....	24
3.7 Análise Estatística e controle de qualidade das amostras analisadas.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1 Teor de silício disponível no solo	25
4.2 Efeito dos fertilizantes silicatados sobre o pH e a disponibilidade de nutrientes	27
4.3 Teores de silício e nutrientes na parte aérea e raízes de plantas de milho	32
6 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1 INTRODUÇÃO

O silício (Si) é um elemento amplamente encontrado na crosta terrestre e presente em minerais como quartzo, caulinita e feldspato. Esse elemento é considerado benéfico para as plantas por ser relacionada à resistência a estresses bióticos e abióticos, melhoria na acumulação de nutrientes e aumento de produtividade e qualidade das culturas. Embora o Si esteja em abundância no solo, ele geralmente se encontra na forma de compostos de baixa solubilidade, tornando-se pouco disponível para as plantas. O Si é absorvido pelas raízes na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) e se deposita nas folhas na forma de sílica ($\text{SiO}_2\text{nH}_2\text{O}$), formando os fitólitos. Devido às suas propriedades benéficas sobre as culturas, o Si tem despertado grande interesse da pesquisa agrônômica.

Nas últimas décadas, o uso de fertilizantes silicatados tem sido incrementado devido aos bons resultados na produtividade, nutrição mineral e proteção de plantas de milho. Nos solos agrícolas, as quantidades de Si demandadas pelas culturas tornam o solo gradativamente mais deficiente do elemento, exigindo reposição do elemento por meio da adubação. Existem diversas fontes de fertilizantes com Si, por exemplo silicatos de Ca, Na, K e Mg, terra diatomácea, areia de quartzo, wollastonita, palha e casca de trigo, além, de escórias de siderurgia. Devido às variações nos teores de Si solúvel e total em diferentes fertilizantes, é necessário considerar a quantidade disponível para as plantas aplicada no solo para obter melhores respostas das culturas.

Nas plantas, os depósitos de sílica, ou fitólitos, proporcionam melhoria na arquitetura foliar e em alguns processos metabólicos. A concentração do elemento na planta pode variar, chegando a níveis superiores aos dos macronutrientes, apresentando cerca de 1 a 10% da biomassa seca das plantas. As respostas das plantas à disponibilidade de Si acontecem de forma diferente, o que vai depender das espécies classificadas quanto à capacidade de absorver e acumular silício. Vários estudos comprovaram a eficiência de fertilizantes silicatados como fornecedor de Si para plantas tão diversas quanto cana-de-açúcar, milho, melão e cebola, resultando em aumento na biomassa, melhor desempenho das culturas e aumento das concentrações de N, P, K e S nos tecidos foliares.

Dada a diversidade de fertilizantes silicatados encontrados no mercado, este trabalho se propõe estudar a resposta de plantas de milho à aplicação de diferentes fertilizantes silicatados a partir da produção de biomassa e do acúmulo de Si nas diferentes partes da planta,

além da capacidade do Si em elevar a disponibilidade de macro e micronutrientes para a planta.

1.1 Hipóteses

- Fertilizantes contendo Si têm efeitos positivos mas diferem quanto à capacidade em fornecer o elemento e aumentar a biomassa de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em casa de vegetação;
- A fertilização silicatada aumenta a acumulação de Si e nutrientes pelas plantas de milho.

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

Avaliar o crescimento das plantas de milho e os teores de nutrientes na planta e solo, em função da aplicação de diferentes doses e fontes de silício.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Avaliar a eficiência de fontes de Si CaSiO_3 (SC), terra diatomácea (TD), agrosilício (AGRO) e agrisilica (AGRI) em aumentar a disponibilidade de Si no solo;
- Avaliar a produção da biomassa seca de raízes e parte aérea, altura, diâmetro do colmo, comprimento, largura e número de folhas e a alocação de Si nas raízes e parte aérea de plantas de milho cultivadas em solo fertilizado com diferentes fontes de Si;
- Quantificar os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu), magnésio (Mg) manganês (Mn) e boro (B) no solo antes e após a colheita;
- Determinar a influência dos teores de Si no solo e nas plantas sobre as concentrações de N, P, K, Ca, Fe, Zn, Cu, Mg, Mn e B na raiz e na parte aérea, para cada um dos diferentes fertilizantes silicatados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Silício em solos e plantas

O silício (Si) é um elemento químico de número atômico 14 e massa atômica 28,085, pertencente ao Grupo 14 da Tabela Periódica. Ele apresenta duas formas alotrópicas, sendo uma delas um pó amorfo de cor marrom e a outra um cristal cinza escuro (SOMMER et al., 2006). Na natureza, o Si pode se encontrar em três estados de oxidação, incluindo -4 , $+2$ e $+4$, sendo que o estado $+4$ o mais comum. Existem três isótopos naturais do Si, que são o ^{28}Si , ^{29}Si e ^{30}Si , com abundâncias relativas de 92,23%, 4,67% e 3,10%, respectivamente. Nos últimos anos, a relação isotópica dos isótopos naturais do Si tem sido utilizada em diversas áreas de pesquisa como uma ferramenta útil e poderosa. Na geologia, a razão $^{30}\text{Si}/^{28}\text{Si}$ tem sido usada para entender a composição da Terra primitiva e a evolução do manto terrestre (TUBAÑA; HECKMAN, 2015).

O Si é um metaloide amplamente distribuído na Terra e é o segundo elemento mais abundante depois do oxigênio, constituindo cerca de 25,7% da massa da crosta (HAYNES, 2014,). No solo, o Si pode ocorrer em três formas: sólida (precipitada), em solução e adsorvida. A fase sólida pode ser cristalina, microcristalina ou amorfa, tendo origem litogênica (GOMES; OSTERRIETH; FERNÁNDEZ HONAINÉ, 2014; TUBAÑA; BABU; DATNOFF, 2016), sendo encontrado em diversos minerais, como quartzo, mica, feldspato e caulinita. Apesar da abundância em solos, a maioria dos compostos de Si são praticamente insolúveis e não estão disponíveis para as plantas (HAYNES, 2014; RICHMOND; SUSSMAN, 2023). O ácido monossilícico (H_4SiO_4) é a forma predominante de Si na solução do solo, sendo a forma mais absorvida pelas plantas (HODSON et al., 2005).

Em vários países, incluindo os Estados Unidos e o Brasil, o Si é considerado uma substância benéfica para as plantas, sendo incluído nas legislações de fertilizantes de ambos os países (AAPFCO, 2018; MAPA, 2020). No Brasil, segundo o Art. 5º do Decreto nº 10.253, de 20 de fevereiro de 2020, o Si é reconhecido como micronutriente e pode ser comercializado como nutriente único ou em mistura com outros nutrientes (BRASIL, 2020).

O Si tem demonstrado efeitos benéficos na promoção do crescimento vegetal, especialmente para plantas sob condições estressantes, conforme verificado em vários experimentos de casa de vegetação e ensaios de campo. Muitos estresses bióticos e abióticos podem ser amenizados com o Si (LIANG et al., 2007; GUNTZER; KELLER; MEUNIER, 2012; VAN BOCKHAVEN; VLEESSCHAUWER; HOFTE, 2013; ZHU; GONG, 2013;

ADREES et al., 2015), o que tem conduzido ao aumento de pesquisas sobre o uso do Si na agricultura, com reflexos de aumento da produtividade em diversas culturas (TUBAÑA; BABU; DATNOFF, 2016; GREGER, 2018).

Embora não seja considerado um elemento essencial para as plantas completarem o seu ciclo de vida, o Si, se disponível em concentração adequada no solo, pode desempenhar um papel importante no metabolismo ou na atividade fisiológica e / ou estrutural e ainda aumentar a resistência de plantas, podendo diminuir os efeitos nocivos causados pela exposição a diferentes estresses bióticos e abióticos (LIANG et al., 2008).

Nas últimas décadas, tem se tornado cada vez mais popular o uso do Si na agricultura, principalmente devido aos seus benefícios na sanidade vegetal, com redução de estresses e consequente aumentos de produtividade. Portanto, o Si pode ser incorporado em uma estratégia sustentável de aumentar a produtividade, uma vez que reduz a dependência de insumos e melhora a eficiência do uso da água e dos nutrientes.

2.2 Fertilizantes silicatados

Os fertilizantes silicatados são cada vez mais utilizados, devido aos benefícios que proporcionam às culturas. Dentre os tipos de fertilizantes silicatados, podemos citar os silicatos de Ca e/ou Mg, de K e de Na, terra diatomácea, agrosilício, agrisilica, e fertilizantes à base de escória (DAS et al., 2020). O uso de fertilizantes contendo Si em sistemas de cultivo vem ganhando cada vez mais atenção devido ao seu custo relativamente baixo, a presença de nutrientes como Ca, Mg, P, Mn e K em alguns deles, e ao efeito de calagem quando se usa silicatos de cálcio, por exemplo (DAS et al., 2020)

Neste cenário, estudos recentes sobre fertilização de Si em várias culturas confirmaram que o mecanismo de redução do estresse e absorção de nutrientes pelas plantas tem correlação positiva com o conteúdo de Si disponível no solo (PATI et al., 2016; PONCE et al., 2022), embora a absorção de Si possa variar para diferentes culturas. Ademais, o tipo e o manejo do solo devem ser considerados com cuidado na fertilização silicatada, pois é um dos fatores mais importantes no controle da mobilização e disponibilidade deste elemento (GUNTZER; KELLER; MEUNIER, 2012; AMOAKWAH, et al., 2023).

A terra diatomácea (TD) é uma rocha de origem sedimentar ou biogênica, formada pela deposição de carapaças de fósseis de algas ricas em silício (diatomáceas) (KORUNIC et al., 2016). As diatomáceas são algas unicelulares com mais de 25 mil espécies com morfologias diferentes (ROUND; CRAWFORD; MANN, 1990). Este material tem sido amplamente

utilizado como um bioestimulante e como um controle biológico de pragas e doenças de plantas. Estudos do uso da terra diatomácea em plantas de milho cultivado em casa de vegetação apresentaram efeitos positivos na produção de biomassa, na absorção de nutrientes e na redução da toxicidade por Cd (SILVA et al., 2021). A TD também aumentou a produtividade de diversas culturas, como o arroz (PRAKASH; ANITHA; SANDHYA, 2016; SANDHYA; PRAKASH; MEUNIER, 2018)

No Brasil, outros estudos foram realizados sobre o potencial de fertilizantes produzidos com TD como fonte de Si em comparação com outras fontes amplamente utilizadas. Nascimento et al. (2021) mostraram a eficiência de um fertilizante à base de TD como fornecedor de Si para plantas de cana-de-açúcar e milho cultivadas em dois tipos de solo, com aumento linear na biomassa de cana-de-açúcar e milho nos solos testados. Além disso, o fertilizante melhorou o desempenho da cultura ao aumentar as concentrações de N, P, K e S nas plantas. Quando comparado com a fonte de silicato de cálcio, o fertilizante à base de TD proporcionou o mesmo potencial de suprimento de Si para as plantas testadas e maior rendimento relativo de biomassa.

O agrosilício é um fertilizante à base de silicato de cálcio e magnésio com 36% e 9%, respectivamente dos elementos Ca e Mg, que fornece Si solúvel para as plantas, além de elementos como cálcio e magnésio (AGROSILÍCIO, 2024). Seu efeito é mais expressivo sobre o controle de pragas e doenças, resistência a estresse hídrico, aumento na resistência mecânica de células e aumento na capacidade fotossintética (PEREIRA et al., 2003; REIS et al., 2008). Além disso, ele pode aumentar a produtividade e a qualidade de diversas culturas, como café, cana, arroz, soja e milho (MIRANDA et al., 2018; SILVA et al., 2021)

A agrisilica é um fertilizante granulado (2,0–5,0 mm) AgrisilicaTM (26% Si, 0,07% N, 0,02% P, 0,08% K, 0,09% S, 1,4% Ca, 1,1% Mg, 1,3% Fe, 219 mg kg⁻¹ de Mn, < 5 mg kg⁻¹ de B, 22 mg kg⁻¹ de Cu, 18 mg kg⁻¹ de Zn e 2,1 mg kg⁻¹ de Mo) da Agripower Australia Limited, ele tem como base a terra diatomácea natural derivada da espécie *Melosira granulata* (VENÂNCIO et al., 2022). Estudos têm mostrado que o uso de agrisilica pode melhorar o desenvolvimento das plantas, e conseqüentemente aumento da produção de biomassa, a absorção de nutrientes e a resistência a diversos estresses como a salinidade e seca (JOHNSON et al., 2022; NASCIMENTO et al., 2021). A agrisilica tem sido utilizada com sucesso em diversas culturas, como cana-de-açúcar, milho, beterraba (NASCIMENTO et al., 2021; PRENTICE, 2017).

Fertilizantes silicatados diversos podem ter efeitos diferentes sobre as culturas. Por exemplo, cinco fertilizantes silicatados testados diferiram quanto a capacidade de

disponibilizar Si para o solo e para a cana-de-açúcar cultivada em vasos. Para as fontes escória de silicato de cálcio, fosfato de magnésio (termo) fundido, poeira de rocha vulcânica, silicato de magnésio e silicato de potássio granular, o conteúdo total de Si das fontes não se correlaciona direta e necessariamente com o fornecimento de Si de solo solúvel de um produto e a subsequente absorção da planta. Entre as fontes, o silicato de cálcio produziu as maiores concentrações de Si na folha, mas as concentrações mais baixas de Si no solo disponíveis para plantas do que o termofosfato. Este último, com Si total ligeiramente maior do que a escória, produziu aumentos substancialmente maiores no Si do solo do que todos os outros produtos, mas não elevou significativamente a folha Si acima dos controles (KEEPING, 2017).

Em suma, os fertilizantes silicatados apresentam benefícios significativos para as plantas e podem ser utilizados de forma complementar aos fertilizantes convencionais. No entanto, estudos sobre múltiplos fertilizantes e doses diversas precisam ser analisadas para uma melhor compreensão sobre os seus benefícios para as plantas e viabilidade técnica e econômica para culturas.

2.3 Relação silício e respostas de plantas

As respostas das plantas à disponibilidade de Si variam com as culturas, em parte, devido a diferenças em capacidade de acumulação do elemento. A concentração de Si nas plantas pode igualar ou superar aquela dos macronutrientes, chegando a representar de 1 a 10% da biomassa seca (MARSCHNER, 1995). As plantas podem ser classificadas quanto à capacidade de absorver e acumular Si, chegando a ter variações de 1 a 100 g kg⁻¹ (EPSTEIN, 1999).

As plantas acumuladoras possuem uma alta capacidade de absorção e acumulação de Si e são capazes de concentrar esse elemento em seus tecidos a níveis que variam entre 10 e 15% em massa (MA; YAMAJI, 2015). Algumas das plantas acumuladoras mais conhecidas incluem a cana-de-açúcar, o arroz, o bambu e o capim-elefante (MA; YAMAJI, 2006; ROYCHOWDHURY; KHAN; CHOUDHURY, 2018). Essas plantas possuem mecanismos de transporte ativo de Si, que envolvem proteínas de transporte de Si nas membranas celulares (MA; YAMAJI 2008). As plantas acumuladoras intermediárias têm uma capacidade intermediária de absorção e acumulação de Si, com níveis de concentração de Si em seus tecidos variando entre 5 e 10% em massa (MA; YAMAJI, 2006; ROYCHOWDHURY; KHAN; CHOUDHURY, 2018). Essas plantas também possuem mecanismos de transporte

ativo de Si, mas em menor grau do que as plantas acumuladoras (MA; YAMAJI, 2006; ROYCHOWDHURY; KHAN; CHOUDHURY, 2018).

As não acumuladoras (no geral leguminosas), possuem uma capacidade limitada de absorção e acumulação de Si, com níveis de concentração de Si em seus tecidos abaixo de 5% em massa (MA; YAMAJI, 2006; ROYCHOWDHURY; KHAN; CHOUDHURY, 2018). Essas plantas geralmente absorvem Si via fluxo de transpiração, e não possuem proteínas de transporte de Si nas membranas celulares (MA; YAMAJI, 2008). No entanto, pode ocorrer variações significativas da concentração de Si nos tecidos das plantas da mesma espécie, mas que possuem genótipos diferentes (HODSON et al., 2005). Algumas culturas removem consideráveis quantidades de Si dos solos; por exemplo, cana-de-açúcar e arroz podem exportar até 300 kg ha⁻¹ e 500 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente, para cada 100 toneladas de colmos produzidas (TUBAÑA; BABU; DATNOFF, 2016).

O Si absorvido pelas plantas é depositado nas paredes das células da epiderme, fortalecendo sua estrutura por formar uma barreira que fornece resistência e suporte mecânico à matriz extracelular (DALASTRA et al., 2011; GUERRIERO et al., 2016), protegendo a folha contra o ataque de pragas e doenças (RODRIGUES; DATNOFF, 2015). Diversos outros benefícios são proporcionados pelo Si, como a diminuição da transpiração, maior acúmulo de matéria seca e número de folhas, maior rigidez dos tecidos estruturais proporcionando folhas mais eretas e, assim, maior capacidade fotossintética, diminuição de acamamento e competição por luz (EPSTEIN, 1999).

Em virtude disso, os fertilizantes à base do elemento estão sendo incluídos nas práticas agronômicas de algumas culturas, a exemplo do arroz, que apresenta transportador na membrana específico para Si (LI et al., 2022) extração de Si com os cultivos demanda o fornecimento de Si para culturas via fertilizantes (TUBAÑA; BABU; DATNOFF, 2016) com o intuito de reduzir a deficiência do elemento e promover o aumento da produção agrícola. Encontrar condições ambientais ideais são raras, assim a planta enfrenta estresses diferentes em magnitude variada. Desta maneira, a aplicação de Si no campo resulta em melhoria significativa do rendimento (PATI et al., 2016), gerando maior lucratividade caso a escolha do fertilizante e o modo de aplicação sejam bem definidos.

Resultados da aplicação de um fertilizante a base de terra diatomácea (agrisilica) demonstraram que o conteúdo de Si disponível nas camadas de solo avaliadas (0,0–0,2 m 0,2–0,4 m) aumentou com as doses do fertilizante. As concentrações de Si nas folhas e caules foram até 5 a 8 vezes maiores nas plantas corrigidas com o fertilizante à base de TD do que

no controle, além de aumentar as concentrações de N, P, K, Ca, Fe, Mn, Cu e Zn nas plantas. Os parâmetros de crescimento da cana-de-açúcar mostraram uma relação positiva com o Si nas plantas; a altura e o diâmetro do caule e a biomassa da folha seca foram 50, 58 e 71% maiores nos 750 kg ha⁻¹ em comparação com o controle (OLIVA et al., 2021).

Aumento da produtividade em função do aumento das doses de Si foram observados para melancia usando diferentes fontes: termofosfato de cálcio e magnésio, silicato de cálcio, magnésio e potássio (SANTOS et al., 2010). Souza et al. (2015) observaram que a aplicação de silicato de cálcio e magnésio afetou significativamente o desenvolvimento inicial de milho, como o aumento linear no diâmetro do colmo e da área foliar das plantas em função do aumento das doses de Si.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Montagem e condução do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação durante o período de setembro a outubro de 2022. Para tal, foi coletado um Argissolo Vermelho Amarelo na profundidade de 0-20 cm, que foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha de 2mm para realização da caracterização física e química antes da aplicação dos fertilizantes (Tabela 1). Para montagem do experimento foi realizada a correção do pH do solo com calcário. Com base na curva de incubação prévia, carbonato de cálcio (CaCO₃) e carbonato de magnésio (4MgCO₃.Mg(OH)₂.5H₂O) com relação molar (Ca:Mg) 3:1 foram aplicados ao solo proporcionando a elevação do pH de 4,77 para 6,8-7,0 após 15 dias do corretivo em contato com o solo.

Tabela 1- Caracterização do solo utilizado no experimento

pH ^a (H ₂ O)	4,77
Ca ^a (cmol _c dm ⁻³)	6,70
Mg ^a (cmol _c dm ⁻³)	0,55
Al ^a (cmol _c dm ⁻³)	0,40
Na ^a (cmol _c dm ⁻³)	0,30
K ^a (cmol _c dm ⁻³)	0,01
P ^a (mg kg ⁻¹)	2,9
Si CaCl ₂ ^b (mg kg ⁻¹)	2,4
Cd (3051A) ^c (mg kg ⁻¹)	0,7
COT ^a (g kg ⁻¹)	15
Areia ^a (g kg ⁻¹)	603
Silte ^a (g kg ⁻¹)	37
Argila ^a (g kg ⁻¹)	360

a- Teixeira et al., 2017; b- Korndörfer et al., 2004; c- USEPA, 2002. COT = carbono orgânico total.

Posteriormente à correção do solo, foi realizada a adubação das unidades experimentais. Cada vaso recebeu as seguintes doses e fontes: 300 mg dm⁻³ de N (SFT); 900 mg dm⁻³ de K (K₂SO₄ e KH₂PO₄); 2400 mg dm⁻³ (corrigir para todos) de P (SFT, KH₂PO₄ e CaHPO₄); 240 mg dm⁻³ de S (K₂SO₄); 21,98 mg dm⁻³ de Mn (MnCl₂.4H₂O); 24 mg dm⁻³ de Zn (ZnSO₄.7H₂O); 7,97 mg dm⁻³ de Cu (CuSO₄, FeSO₄.7H₂O); e 0,90 mg dm⁻³ de Mo (Na₂MoO₄.2H₂O) (SOUZA; LIMA et al., 2007). Os tratamentos consistiram de quatro doses de cada fertilizante (equivalentes a 100, 300, 600, 1000 kg ha⁻¹) de quatro fontes de Si (CaSiO₃, TD, agrosilício e agrisilica) mais o controle (sem adição de Si), com três repetições, totalizando 51 unidades experimentais.

Cada unidade experimental foi representada por um vaso contendo 6 kg de solo e duas plantas. Os tratamentos foram incorporados ao volume de solo, homogeneizados e o solo mantido com umidade a 80% da capacidade de campo. As fontes de Si utilizadas, foram caracterizadas quimicamente por espectrômetro de fluorescência de raios-X Rigaku modelo ZSX Primus II (Tabela 2). As mesmas, também foram caracterizadas quanto a porcentagem de Si solúvel, SC (0,03%), TD (0,08%), AGRO (3,86%) e AGRI (0,13%), a determinação seguiu o método Na₂CO₃+NH₄NO₃ adaptado de Korndörfer et al. (2004) e Pereira et al. (2003). Em cada vaso, foram semeados 5 grãos de milho da variedade São José, adquiridas junto ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA). Após 8 dias de germinação, o desbaste foi realizado deixando apenas duas plantas por vaso.

Tabela 2- Caracterização química dos fertilizantes

ELEMENTOS (%)	SC	TD	AGRO	AGRI
Na ₂ O	0,37	N.D.	N.D.	N.D.
MgO	4,49	0,14	8,39	2,95
Al ₂ O ₃	0,20	5,17	2,26	16,76
SiO ₂	49,54	88,93	25,43	59,53
P ₂ O ₅	0,39	0,46	0,41	0,45
K ₂ O	N.D.	0,06	N.D.	0,05
CaO	0,04	0,13	0,11	0,54
MnO	N.D.	0,03	2,10	0,04
Fe ₂ O ₃	N.D.	N.D.	0,84	N.D.
CuO	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
ZnO	N.D.	N.D.	0,02	0,01

N.D. = não detectado; SC= Silicato de cálcio; TD= Terra diatomácea; AGRO= Agrosilício; AGRI= Agrisilica.

3.2 Coletas de dados de biometria

Decorridos 44 dias após a semeadura, realizou-se a biometria de todas as plantas do experimento. Foram medidos altura, diâmetro do caule, comprimento, largura e número de folhas, bem como a massa seca tanto da raiz quanto da parte aérea. A altura da planta foi mensurada com o auxílio de uma fita métrica tendo por base o nível do solo até a inserção da última folha definitiva. O diâmetro do colmo, medido na base do colmo com o auxílio do paquímetro. A contagem do número de folhas definitivas foi feita para todas as folhas nas quais a lígula era visível.

3.3 Coletas das plantas e do solo

As amostras de solo de cada vaso foram coletadas antes da aplicação de calcário e no dia da colheita das plantas. Os solos foram secos ao ar, destorroados, homogeneizados e peneirados em peneira de 2 mm de abertura de malha (TFSA).

As plantas foram coletadas 45 dias após o plantio separadas em raízes e partes aéreas. Para determinação da matéria seca, o material vegetal foi lavado, seco em estufa a 70°C por 96 horas e, por fim, moído em um moinho de facas do tipo Wiley.

3.4 Análise de Si em solo e planta

A determinação do teor de Si solúvel no solo foi realizada sem e com a aplicação dos fertilizantes (PRAKASH; MAJUMDAR, 2021). Foi realizada extração com ácido acético (0,5

mol L⁻¹), onde 3 g de solo foram adicionadas a frascos de polietileno com posterior adição de 30 mL da solução extratora. Depois de permanecerem em agitação por 16h a 50 rpm. As amostras extraídas foram então centrifugadas a 3000 rpm para 3 minutos. Em seguida, alíquotas de 10 mL de cada extrato foram pipetados e colocados em recipientes de 50 mL. Foi adicionado 1 mL de solução sulfo-molibídica (7,5 g L⁻¹). Após 10 min, foi acrescentado 2 mL de ácido tartárico (200 g L⁻¹). Ao final, após 5 min, foi adicionados 10 mL de ácido ascórbico (3 g L⁻¹) para obter coloração azul do extrato e determina-los depois de 1 hora em espectrofotômetro UV-visível, no comprimento de onda de 660 nm.

A análise de Si total nas raízes e folhas de milho foi realizada segundo metodologia adaptada de Korndörfer et al. (2004). Foi pesado 0,1 g da amostra e adicionados 2 mL de H₂O₂ (500 g L⁻¹) e 3 mL de NaOH (500 g L⁻¹) em tubo de centrífuga de 50 mL. O conjunto ficou em banho maria durante 1 h a 75 °C. Em seguida, os tubos foram submetidos a 123 °C e 1,5 atm por 1h hora em autoclave. Posteriormente, foi adicionado aos tubos 45 mL de água destilada e as amostras permaneceram em repouso por 12 horas. Em seguida, 2 mL dos extratos contidos nos tubos foram retirados e diluídos em 18 mL de água destilada. Depois foi adicionado 1 mL de HCl (500g L⁻¹) e 2 mL de molibdato de amônio (100 g L⁻¹). Após 4 min, foi adicionado 2 mL de ácido oxálico (75 g L⁻¹) para excluir interferência de Fe e P. Finalmente, as determinações foram realizadas em espectrofotômetro UV-visível no comprimento de onda de 410 nm.

3.5 Análises no solo

Para o solo, antes e após o plantio, foram avaliadas as seguintes características químicas: pH, N, P, K, Na, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn e B. O pH foi determinado em água com relação 1:2,5 (solo: solução); K⁺ e Na⁺ trocáveis extraídos com a solução de Mehlich⁻¹ e determinados por fotometria de emissão de chama; Ca⁺² e Mg⁺² trocáveis determinados pelo método volumétrico por titulação com EDTA (0,025 mol L⁻¹) após a extração desses cátions pela solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L⁻¹; P disponível por colorimetria após extração com a solução de Mehlich⁻¹ (TEIXEIRA et al., 2017). O N foi extraído pela digestão de 0,5 g de amostra de solo (TFSA) e 1 g da mistura de sais em 4 mL de H₂SO concentrado a 300°C, de acordo com o método de Kjeldahl, analisadas pelo método de Kjeldahl (BALIEIRO E ALVES, 2017).

Os teores de Zn, Cu, Fe, Mn e B foram extraídos com solução Mehlich⁻¹ (LINDSAY; NORWELL, 1978), foi pesado 5,0 gramas de solo foram adicionadas em erlenmeyer com 25

mL de solução Mehlich⁻¹ (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹). As amostras foram agitadas durante 5 minutos a 120 rpm. Após a agitação, as amostras foram filtradas. A determinação dos elementos foi realizada por espectrometria de emissão ótica (ICP-OES).

3.6 Determinação de nutrientes nas plantas

Para determinação de Ca, Mg, N, K, P, Fe, Mn, Cu, B e Zn nos tecidos de raiz e folhas foram adicionados 0,5 g do material vegetal + 2 mL de H₂O₂ + 8 mL de HNO₃ em tubos de teflon. O conjunto foi submetido a temperatura de 180° C durante 10 min em forno micro-ondas. Posteriormente, o material foi filtrado, e o volume completado para 25 mL. As determinações de P e K foram realizadas por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente. Os teores de Cu, Fe, Mn, Zn e B na planta foram determinados por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado (ICP – OES Perkin Elmer 7000 DV) (TEIXEIRA et al., 2017). O N foi extraído pela digestão de 0,1 g do material vegetal e 1 g da mistura de sais (K₂SO₄ + CuSO₄ (10:1))em ácido sulfúrico concentrado a 350°C, de acordo com o método de Kjeldahl, analisadas pelo método de Kjeldahl (MIYAZAWA et al., 2009).

3.7 Análise Estatística e controle de qualidade das amostras analisadas

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com p <0,05, e teste de médias (Tukey a 5% de probabilidade). Foram utilizadas equações de regressão para avaliar os efeitos das doses de fertilizantes aplicados sobre o rendimento da biomassa e os teores de Si na planta, assim como entre as doses dos fertilizantes e o acúmulo de Si, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn e B nas plantas e no solo. As análises estatísticas foram realizadas pelo software SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2011).

Para o controle de qualidade das análises de nutrientes na biomassa foram utilizadas amostras em branco e amostras certificadas pelo NIST (National Institute Standard and technology) para tecidos da planta (1570A Trace *Spinach Leaves* e RMAgro E1001 a *Brachiaria Brizantha*).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

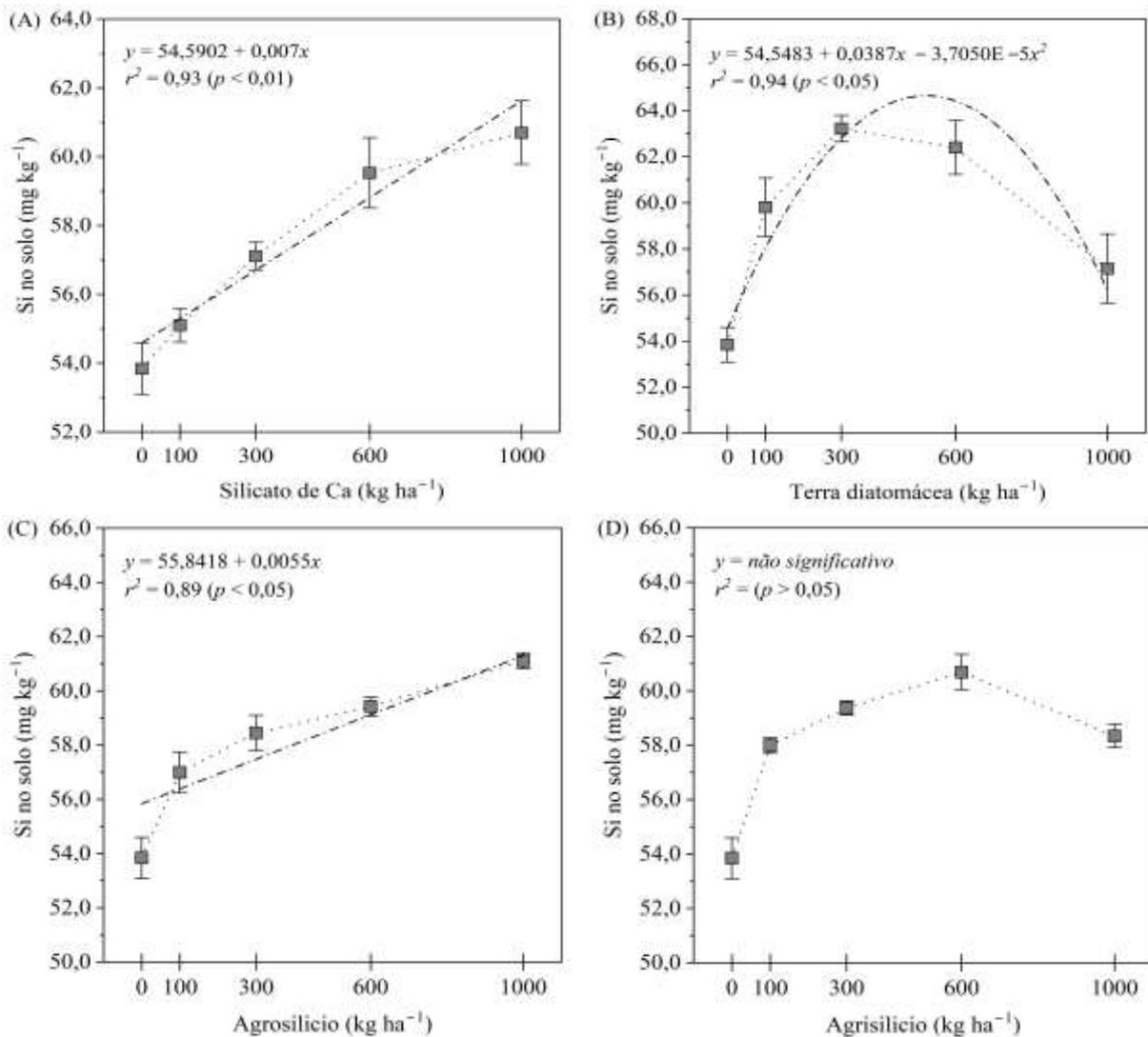
4.1 Teor de silício disponível no solo

O teor de Si no solo respondeu linearmente à aplicação das fontes silicatadas SC e AGRO (Figuras 1A e 1C), enquanto TD exibiu um comportamento quadrático (Figura 1B). Para o fertilizante AGRI não foi encontrado ajuste significativo em relação à aplicação das doses (Figura 1D). A adição de 1000 kg ha⁻¹ de SC e AGRO incrementou aproximadamente 6,86 e 6,78 mg kg⁻¹, respectivamente, no teor de Si disponível no solo, representando um aumento de 12% em relação ao teor inicial.

Como as concentrações de Si solúvel no solo são influenciadas pelo pH, o manejo químico do solo pode ter afetado sua solubilidade e disponibilidade. O solo utilizado no experimento é classificado como Argissolo vermelho amarelo distrófico, possuindo alto grau de intemperização. Solos muito intemperizados, pouco contribuem com os minerais primários na disponibilidade de Si. Logo, como a solubilidade de Si apresenta uma tendência à diminuição em solos ácidos (pH < 6), contribuindo para um impacto negativo nos reservatórios biológicos de Si no solo, enquanto que em solos alcalinos (pH 8) a acessibilidade de Si solúvel às plantas é maior (HAYNES, 2019). Este aumento no pH do solo pode reduzir a fração de Si sorvido (HAYNES, 2019; KHAN et al., 2021a,b).

A aplicação de calagem pode aumentar a disponibilidade de Si ao elevar o pH do solo. Para o cultivo das plantas de milho, o solo teve seu pH corrigido de 4,77 para 7,0, apresentando uma tendência ascendente na dessorção de Si sobre os coloides do solo para os fertilizantes SC e AGRO, fontes de silicato de Ca. Com o aumento do pH, ocorre a conversão potencial do ácido polissilícico em ácido monossilícico, que é solúvel e, portanto, aumenta o conteúdo de Si disponível (PRAKASH; MAJUMDAR, 2021; HAYNES et al., 2019).

Figura 1. Teores médios (\pm desvio padrão) de silício no solo fertilizados com Silicato de cálcio (A); Terra diatomácea (B); Agrosilício (C) e Agrisilica (D), após o cultivo. $p < 0,01$ significativo a 1% de probabilidade pela ANOVA; $p < 0,05$ significativo a 5% de probabilidade pela ANOVA.



A aplicação de 300 kg ha⁻¹ de TD ocasionou um aumento de 9,38 mg kg⁻¹ do Si em comparação com o controle (Figura 1B), é possível observar um crescimento nos teores de Si disponível à medida que as doses aumentam. Entretanto, é perceptível uma saturação em torno de 300 kg ha⁻¹ a 600 kg ha⁻¹. Esse fato pode ter ocorrido pelo aumento na concentração de ácido silícico na solução do solo, o que leva as concentrações de ácido silícico a ultrapassarem o ponto de saturação, resultando na precipitação de Si na forma amorfa (ILER, 1979; ZHANG et al., 2014), como foi observado nos fertilizantes TD e AGRI. Este processo é conhecido como polimerização do ácido silícico, onde altas concentrações de H₄SiO₄ na solução do solo desencadeiam uma reação que resulta na formação de cadeias estáveis de várias unidades de

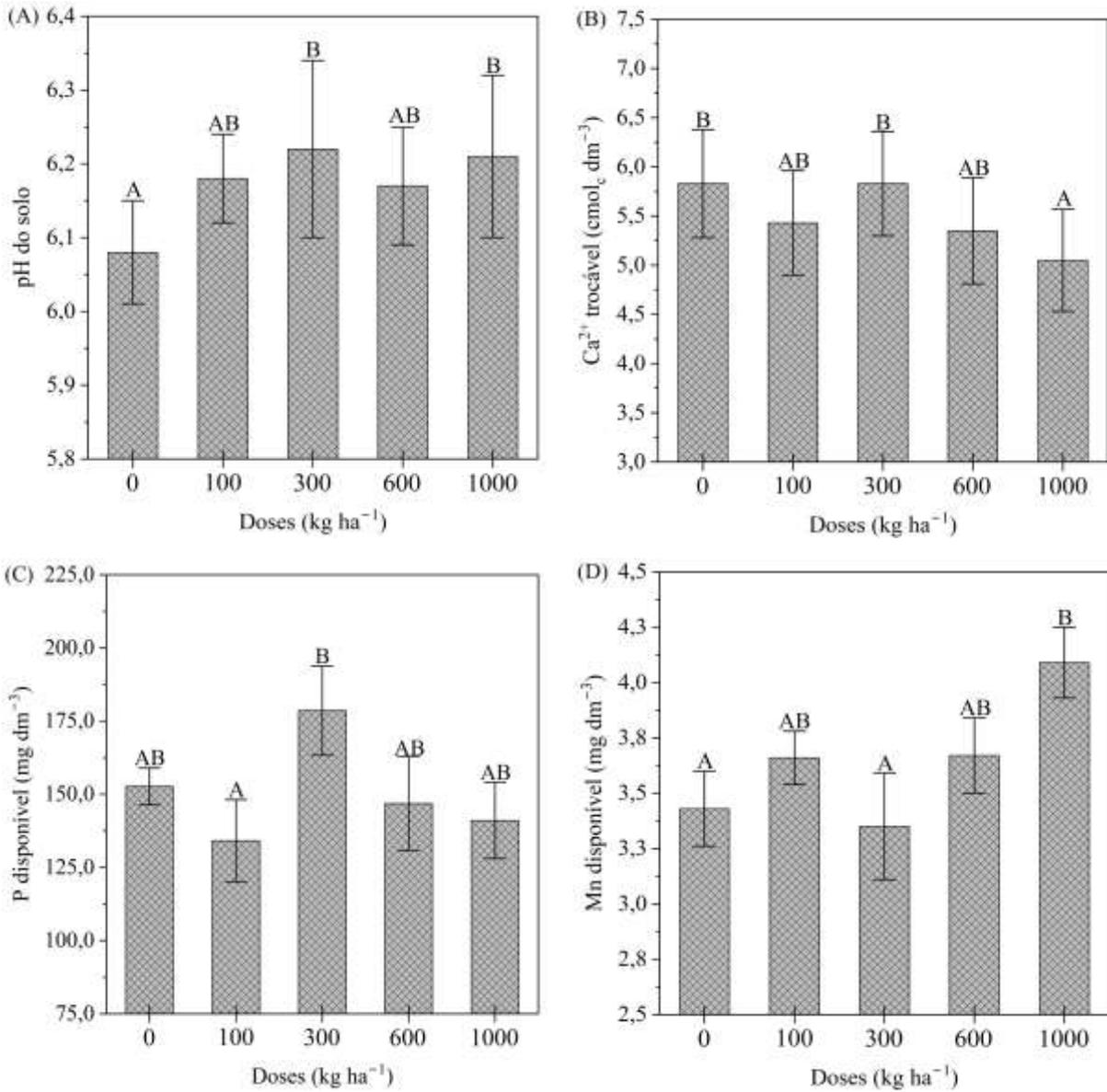
H_4SiO_4 (KNIGHT; KINRADE, 2001). Em condições naturais, a estabilidade do ácido silícico polimerizado é geralmente de curta duração, podendo persistir por algumas horas ou dias antes de se decompor novamente em unidades de H_4SiO_4 (DIETZEL, 2000). Embora sem ajuste de equação, efeito similar a esse foi observado para o fertilizante AGRI. O baixo teor de Si inicial do solo é consequência do avançado grau de intemperismo em que se encontram os solos de regiões tropicais (KORNDÖRFER et al., 1999) e dos elevados teores de areia do solo em estudo, com baixos teores de óxidos de Al e Fe, principais responsáveis pela adsorção de Si em solução (SAVANT et al., 1997).

4.2 Efeito dos fertilizantes silicatados sobre o pH e a disponibilidade de nutrientes

Não houve efeito dos fertilizantes SC, TD, AGRO e AGRI sobre o pH (Figura 2A). As doses também não apresentaram diferença significativas entre si, mas apresentaram diferença significativa entre o controle e as doses 300 a 1000 kg ha⁻¹. Após o cultivo foi observado a diminuição significativa do pH em até 0,9 na escala de pH como no caso do tratamento controle. Ramos (2005), em estudo realizado para avaliação de fontes de silício para a cultura do arroz, observou pouca diferença entre os valores de pH e os teores trocáveis de Ca e Mg do solo, entre as fontes testadas (Siligran e Siligran AWM), na dose de 200 kg ha⁻¹.

A diminuição de pH, de aproximadamente 7,5 para 6,2, foi observada para dose 1000 kg ha⁻¹ de Si (Figura 2 A), o que sugere uma diminuição da atividade dos ânions SiO_3^{2-} , como bases e um aumento de sua participação como polímeros de Si atuando como ligantes para formação de complexos insolúveis dos metais. A química do Si mostra que a espécie H_2SiO_3 (ácido metassilícico) resultante da captura de dois prótons H^+ não se estabiliza como tal, tendendo a combinar-se com H_2O para formar o hidroxilácido $\text{Si}(\text{OH})_4$ (ácido monossilícico) (ou H_4SiO_4). Doses maiores que 100 mg dm⁻³ de Si mudam parte da coordenação do elemento de quatro para seis, no íon complexo $[\text{Si}(\text{OH})_5\text{H}_2\text{O}]^-$, ponto de partida para a polimerização (DIETZEL, 2000; PAIM et al., 2006).

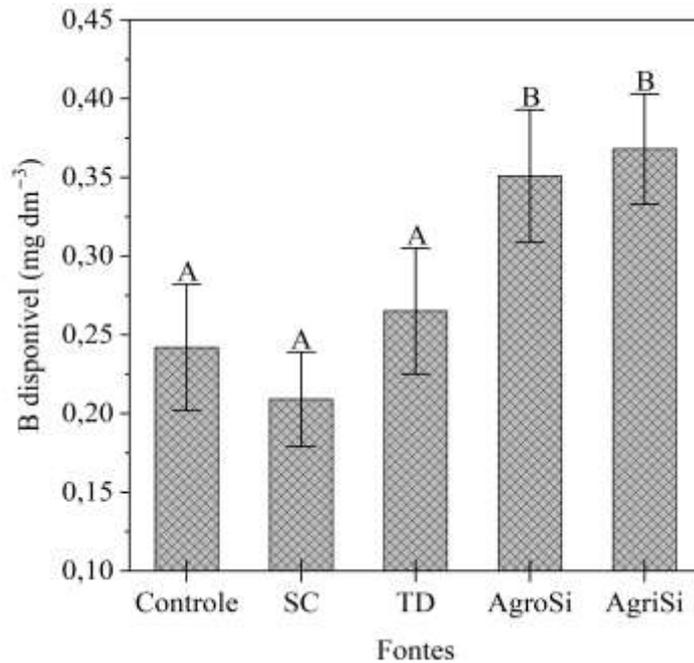
Figura 2. Teores médios (\pm desvio padrão) de pH do solo (A); Ca^{2+} , P e Mn disponível no solo, fertilizados com fontes de silício após (45 dias), previamente tratados com calcário. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



A resposta significativa da disponibilidade de nutrientes à aplicação de doses de fertilizantes no solo pós-colheita é evidenciada nos resultados apresentados (Figuras 2C, 2D e 2E). Foi observado um aumento de 25,89 mg dm⁻³ para P na dose 300 kg ha⁻¹, evidenciando o efeito da dessorção de P por silício (Figura 2 C). Essa mesma tendência foi observada em solos arenosos submetidos a uma aplicação de 375 kg ha⁻¹ de silício (OLIVA et al., 2020). Os silicatos são semelhantes aos fosfatos e podem desloca-los das superfícies dos coloides, dessa forma, os fenômenos de adsorção e dessorção entre esses elementos pode ocorrer (CARVALHO et al., 2000; LEE; KIM, 2007). O ácido silícico tetraédrico (H₄SiO₄) é identificado como o agente responsável pela liberação de P ligado às superfícies de óxidos de ferro, enquanto a forma ionizada H₃SiO₄⁻ desempenha um papel na competição com o fosfato ligado aos óxidos e hidróxidos de ferro no solo (SCHALLER et al., 2019, 2021, 2022). Essa interação do Si com os sítios de adsorção de nutrientes no solo pode influenciar significativamente a disponibilidade de P e outros cátions, afetando os processos de ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo.

Ocorreu resposta significativa ($p < 0,05$) das fontes de Si nas concentrações de B no solo (Figura 3). As fontes SC, TD e o controle não apresentaram diferença significativa. Essas reduções nas concentrações de B podem ser atribuídas à formação de complexos B-Si (boro-silicato) no solo, levando à redução na disponibilidade de B (SOYLEMEZOGLU; DEMIR; INAL; GUNES, 2009). A aplicação dos fertilizantes AGRO e AGRI causaram um aumento significativo no teor do micronutriente B no solo em relação as demais fontes avaliadas. Quando comparado com a disponibilidade de Si no solo, foi possível observar uma relação inversamente proporcional, onde os fertilizantes que disponibilizaram maiores teores de Si no solo apresentaram menores concentrações para B (Figura 3 e Figura 1).

Figura 3. Teores médios (\pm desvio padrão) de Boro (B) no solo fertilizado com fontes silicatadas. Valores médios seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Para N, Mg e K foram encontradas diferenças significativas ($p < 0,05$) para doses e fertilizantes aplicados em relação à testemunha (Tabela 3). Os teores de N foram aumentados pelos fertilizantes SC e AGRI, nas doses 100 kg ha^{-1} e 1000 kg ha^{-1} , respectivamente. Os teores de Mg foram aumentados pelos fertilizantes, AGRO em 30% na dose 100 kg ha^{-1} e AGRI em 52% na dose 600 kg ha^{-1} . Não houve diferença significativa para doses do elemento nos fertilizantes SC e TD (Tabela 3). De maneira geral, ao observar os resultados é possível constatar que AGRI foi o fertilizante que mais contribuiu para a elevação dos teores dos macronutrientes N, K e Mg no solo.

Tabela 3. Teores médios (\pm desvio padrão) de macro e micronutrientes no solo cultivados com milho em solo tratados com calagem e fertilizante silicatados.

Doses kg ha ⁻¹	N (g kg ⁻¹)			
	Silicato de Ca	Terra diatomácea	Agrosilício	Agrisilica
0,0	1,87 \pm 0,03bA	1,87 \pm 0,03bA	1,87 \pm 0,03cA	1,87 \pm 0,03abA
100,0	2,03 \pm 0,13bB	1,79 \pm 0,20bB	1,16 \pm 0,09aA	1,89 \pm 0,08abB
300,0	1,81 \pm 0,23bA	1,87 \pm 0,12bA	1,74 \pm 0,24bcA	1,70 \pm 0,12aA
600,0	1,92 \pm 0,23bA	1,90 \pm 0,15bA	1,81 \pm 0,23cA	1,89 \pm 0,03abA
1000,0	1,25 \pm 0,09aA	1,38 \pm 0,06aA	1,47 \pm 0,03abA	2,03 \pm 0,14bB
	K (cmolc dm ⁻³)			
0,0	0,06 \pm 0,01aA	0,06 \pm 0,01bA	0,06 \pm 0,01bA	0,06 \pm 0,01aA
100,0	0,06 \pm 0,01aA	0,07 \pm 0,01bA	0,05 \pm 0,01abA	0,11 \pm 0,01bB
300,0	0,05 \pm 0,01aA	0,06 \pm 0,01abA	0,05 \pm 0,01abA	0,06 \pm 0,01aA
600,0	0,04 \pm 0,01aA	0,04 \pm 0,00aA	0,05 \pm 0,00abA	0,05 \pm 0,00aA
1000,0	0,09 \pm 0,01bB	0,05 \pm 0,00abA	0,04 \pm 0,01aA	0,04 \pm 0,00aA
	Mg (cmolc dm ⁻³)			
0,0	1,25 \pm 0,05aA	1,25 \pm 0,05aA	1,25 \pm 0,05abA	1,25 \pm 0,05A
100,0	1,37 \pm 0,20aAB	0,60 \pm 0,56aA	1,77 \pm 0,23bB	0,60 \pm 0,17aA
300,0	1,00 \pm 0,15aA	1,30 \pm 0,26aA	0,73 \pm 0,35aA	0,73 \pm 0,15aA
600,0	0,93 \pm 0,08aA	1,03 \pm 0,47aAB	1,20 \pm 0,44abAB	1,90 \pm 0,87bB
1000,0	1,17 \pm 0,10aA	1,30 \pm 0,35aA	1,40 \pm 0,75abA	0,83 \pm 0,31aA
	Fe (cmolc dm ⁻³)			
0,0	80,1 \pm 4,0aA	80,1 \pm 4,0aA	80,1 \pm 4,0aA	80,1 \pm 4,0bA
100,0	72,6 \pm 6,4aA	100,4 \pm 13,8aA	73,7 \pm 4,8aA	69,7 \pm 1,2abA
300,0	71,8 \pm 8,3aA	74,1 \pm 6,2aA	77,8 \pm 10,6aA	100,9 \pm 36,3bA
600,0	71,6 \pm 8,1aA	83,9 \pm 6,0aA	90,8 \pm 21,6aA	74,0 \pm 3,3bA
1000,0	101,7 \pm 47,9aB	79,6 \pm 2,7aB	88,4 \pm 10,4aB	33,5 \pm 0,8aA
	Zn (cmolc dm ⁻³)			
0,0	4,65 \pm 0,34aA	4,65 \pm 0,34aA	4,65 \pm 0,34aA	4,65 \pm 0,34bA
100,0	4,85 \pm 0,45aA	4,56 \pm 0,57aA	4,59 \pm 0,41aA	4,66 \pm 0,25bA
300,0	4,34 \pm 0,34aA	4,26 \pm 0,48aA	4,73 \pm 0,32aA	5,26 \pm 0,87bA
600,0	4,18 \pm 0,34aA	4,66 \pm 0,45aA	4,80 \pm 0,61aA	4,27 \pm 0,38bA
1000,0	4,36 \pm 0,36aB	4,98 \pm 0,49aB	4,76 \pm 0,32aB	2,95 \pm 0,18aA

Valores médios na coluna seguidos pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; valores médios na linha seguidos pela mesma letra maiúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Foram encontradas diferenças significativas ($p < 0,05$) para doses e fertilizantes para Fe e Zn, mas o Cu não apresentou diferenças significativas. Para o micronutriente Fe em relação as fontes, foi observado que a maior dose dos fertilizantes SC e AGRO aumentaram a disponibilidade do nutriente no solo, enquanto para os fertilizantes TD e AGRI a maior dose diminuiu a disponibilidade do elemento no solo (Tabela 3). Quando comparadas as doses, foi possível observar que a dose 1000 kg ha^{-1} do AGRI diminuiu a disponibilidade de Fe no solo quando comparados a dose 0 kg ha^{-1} , houve uma diminuição de $47,05 \text{ cmolc dm}^{-1}$.

Dados mostram que Zn teve um comportamento parecido ao Fe, a disponibilidade do elemento aumentou na maior dose dos fertilizantes TD e AGRO, enquanto os fertilizantes SC e AGRI diminuíram a sua disponibilidade no solo a medida que foram aumentadas as doses. Os teores de Zn diminuíram em $1,7 \text{ cmolc dm}^{-1}$ com aumento das doses do fertilizante AGRI, quando comparado com o controle (Tabela 3). Embora os teores decresçam para esse fertilizante, esse elemento encontram-se em concentrações suficientes para suprir as necessidades nutricionais das plantas. Esses resultados contradizem os encontrados por Greger et al. (2018), que observaram um aumento de Zn 3–90% e Fe $\approx 10\%$ quando aplicado 1000 kg ha^{-1} de Si no solo. O aumento da disponibilidade dos micronutrientes Fe e Mn pode estar ligado à composição da fonte AGRO, que além de 3,86% de Si solúvel, possui 0,84% de Fe e 2,10% de Mn (Tabela 2).

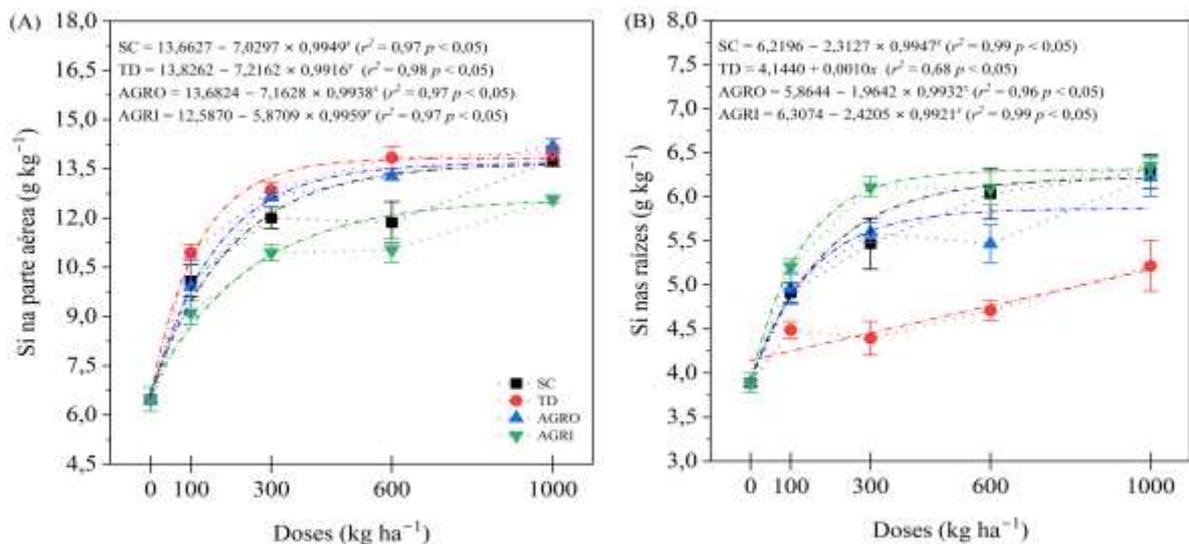
Ocorreram respostas significativas ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey, da interação entre as concentrações de Mn no solo e as doses aplicadas (Figura 2 D). Os dados mostram que os teores de Mn no solo na dose 300 kg ha^{-1} , teve uma queda de $1,12 \text{ mg dm}^{-3}$ em comparação com a maior dose aplicada. Embora esse comportamento seja observado, a dose 1000 kg ha^{-1} apresenta uma alta nos teores do elemento no solo de aproximadamente $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ em relação ao controle e a dose 300 kg ha^{-1} . Greger et al. (2018) ao estudar a influência do silício na disponibilidade e acúmulo de nutrientes minerais em várias espécies vegetais, descobriu que as concentrações de Ca, P, S, Mn, Zn, Cu e Mo aumentou com a aplicação da dose 1000 kg ha^{-1} de silício.

4.3 Teores de silício e nutrientes na parte aérea e raízes de plantas de milho

Todos os fertilizantes testados promoveram aumento significativo nos teores de Si nas raízes e nas partes aéreas das plantas (Figura 4 A e B), com interação significativa entre as fontes e doses. A aplicação de 100 e 1000 kg ha^{-1} de Si incrementou entre 40% e 117% os teores de Si na parte aérea das plantas, em comparação como o controle. As plantas tiveram um

incremento de 117%, 116%, 111% e 91%, com a aplicação de 1000 kg ha⁻¹ de AGRO, TD, SC e AGRI, respectivamente. Contudo, a partir da dose de 300 kg ha⁻¹ de TD e AGRO as concentrações na planta apresentaram uma tendência constante, demonstrando ser a melhor dose para esses fertilizantes. A diferença de incremento entre as doses 300 e 600 kg ha⁻¹ foi cerca de 16% e 11%, entre as doses 300 e 1000 kg ha⁻¹ foi cerca de 19% e 23%, já entre as doses 600 e 1000 kg ha⁻¹ foi cerca de 3% e 12%, respectivamente, o que não justifica a aplicação de doses mais elevadas dos fertilizantes, tanto economicamente, quanto em ganhos de produtividade. Mesma tendência foi observada em estudo com doses crescentes de fertilizante à base de terra diatomácea, promovendo o aumento linear nas concentrações de Si na parte aérea da cultura do milho e cana-de-açúcar em dois tipos de solos (NASCIMENTO et al., 2019). Entre os fertilizantes, o AGRI foi o que menos contribuiu para o aumento de Si nas plantas.

Figura 4. Teores médios (\pm desvio padrão) de Si na parte aérea (A) e raízes (B) de plantas de milho cultivadas em solo fertilizado com fontes de silício, previamente tratado com calcário. $p < 0,05$ significativo a 5% de probabilidade pela ANOVA.

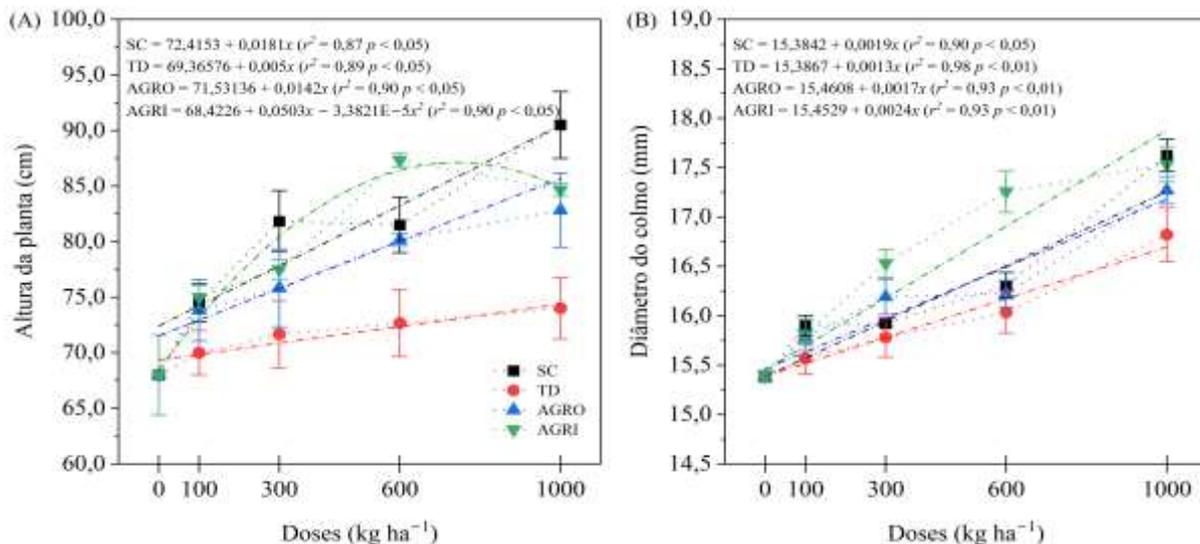


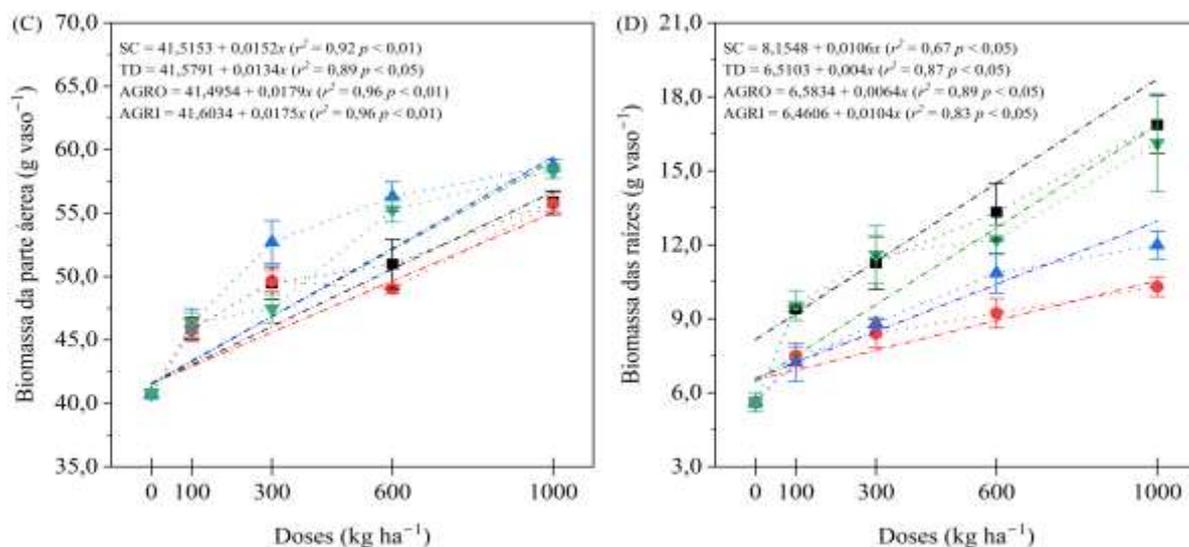
O Si tem alto acúmulo por espécies gramíneas como cana-de-açúcar, arroz, trigo e milho (AHMED et al., 2007; WHITE et al., 2016). Na planta, a distribuição varia de acordo com a espécie, ocorrendo de maneira uniforme entre raízes e parte aérea em plantas que acumulam pouco Si, e nas acumuladoras, como o arroz (*Oryza sativa*), 90% do elemento encontra-se na parte aérea (MENGEL; KIRKBY, 1987). Quanto maior a transpiração da planta, maior o acúmulo de Si, visto que o mesmo se transporta pelo fluxo transpiracional (LANA et al., 2003).

Nas raízes, os fertilizantes SC, AGRO e AGRI apresentaram um comportamento quadrático enquanto a TD apresentou um comportamento linear (Figura 4 B). A aplicação de 100 e 1000 kg ha⁻¹ das fontes silicatadas incrementou entre 15% e 62% os teores de Si nas raízes das plantas em comparação com o controle, respectivamente (Figura 4). O SC e AGRI foram os fertilizantes que mais se ajustaram ao modelo de regressão ($r^2 = 0,99$), aumentando em 51% e 56% os teores de Si nas raízes na dose 300 kg ha⁻¹. O mecanismo de absorção de Si pelas espécies consideradas acumuladores (por exemplo, milho e arroz) é sugerido ser ativo de Si, portanto, são capazes de translocar e acumular grandes quantidades de Si na parte aérea (EPSTEIN 1999; FUHRS et al., 2012), com menores teores nas raízes.

Os resultados indicam que a aplicação de Si aumentou significativamente todos os parâmetros de crescimento (Figura 5). A aplicação de SC, TD, AGRO e AGRI incrementou linearmente a biomassa da parte aérea e raízes ($p < 0,01$ e $p < 0,05$) (Figura 5 C e D). A dose 1000 kg ha⁻¹ promoveu incremento de 61,5, 61,5, 44 e 41,5% e 184, 76, 103 e 171% na biomassa da parte aérea e raiz, respectivamente, para os fertilizantes SC, TD, AGRO E AGRI. Esses resultados demonstraram que o Si tem efeito positivo sob a produção de biomassa, que corroboram com estudos realizados com soja (GONZALO et al., 2013), pepino (BITYUTSKII et al., 2014), cevada (NIKOLIC et al., 2019).

Figura 5. Valores médios (\pm desvio padrão) da altura da planta (A); Diâmetro do colmo (B); biomassa da parte aérea (C) e biomassa das raízes (D) de plantas de milho cultivadas em solo fertilizado com fontes de silício, previamente tratado com calcário. $p < 0,01$ significativo a 1% de probabilidade pela ANOVA; $p < 0,05$ significativo a 5% de probabilidade pela ANOVA.





A altura das plantas e diâmetro do colmo responderam positivamente a aplicação das doses dos fertilizantes, a dose 1000 kg ha⁻¹ dos fertilizantes SC, TD e AGRO, demonstraram ter uma maior eficiência sobre as plantas, aumentandoem até 40 cm a altura e 3 cm o diâmetro do colmo do milho após 45 dias do plantio. (Figura 5 A e B).

O Si tem demonstrado efeito benéfico no crescimento e desenvolvimento das plantas (MA; YAMAJI, 2008), por desempenhar um papel no metabolismo, na atividade fisiológica e / ou estrutural, proporciona o aumento da resistência das plantas e a redução de estresses bióticos e abióticos (LIANG et al., 2008), acarretando no incremento da altura das plantas e consequentemente, no acúmulo de matéria seca. Os benefícios proporcionados pela adubação silicatada podem se refletir em níveis elevados de clorofila (ÁVILA et al., 2010), aumento na altura, diâmetro do colmo (SOUZA et al., 2015) e consequentemente, ganhos de produtividade (NOJOSA et al., 2006).

Amin et al. (2014) avaliaram o crescimento de dois híbridos de milho P-33H25 e FH810, com aplicação de Si sob duas condições, irrigado e com déficit hídrico, observaram que o Si aumentou significativamente a altura das plantas em 23cm e 32cm, diâmetro do colmo em 0,09 e 0,16 cm, além do número de folhas, comprimento espiga, número de grãos/espiga, peso de 100 grãos, rendimento de grãos e rendimento biológico juntamente com melhoria na taxa fotossintética e redução da taxa de transpiração, respectivamente. Em estudo com a cultura da batata, o fornecimento de Si à base de silicato também promoveu incremento na altura das plantas, assim como maior produção de tubérculos (PULZ et al., 2008).

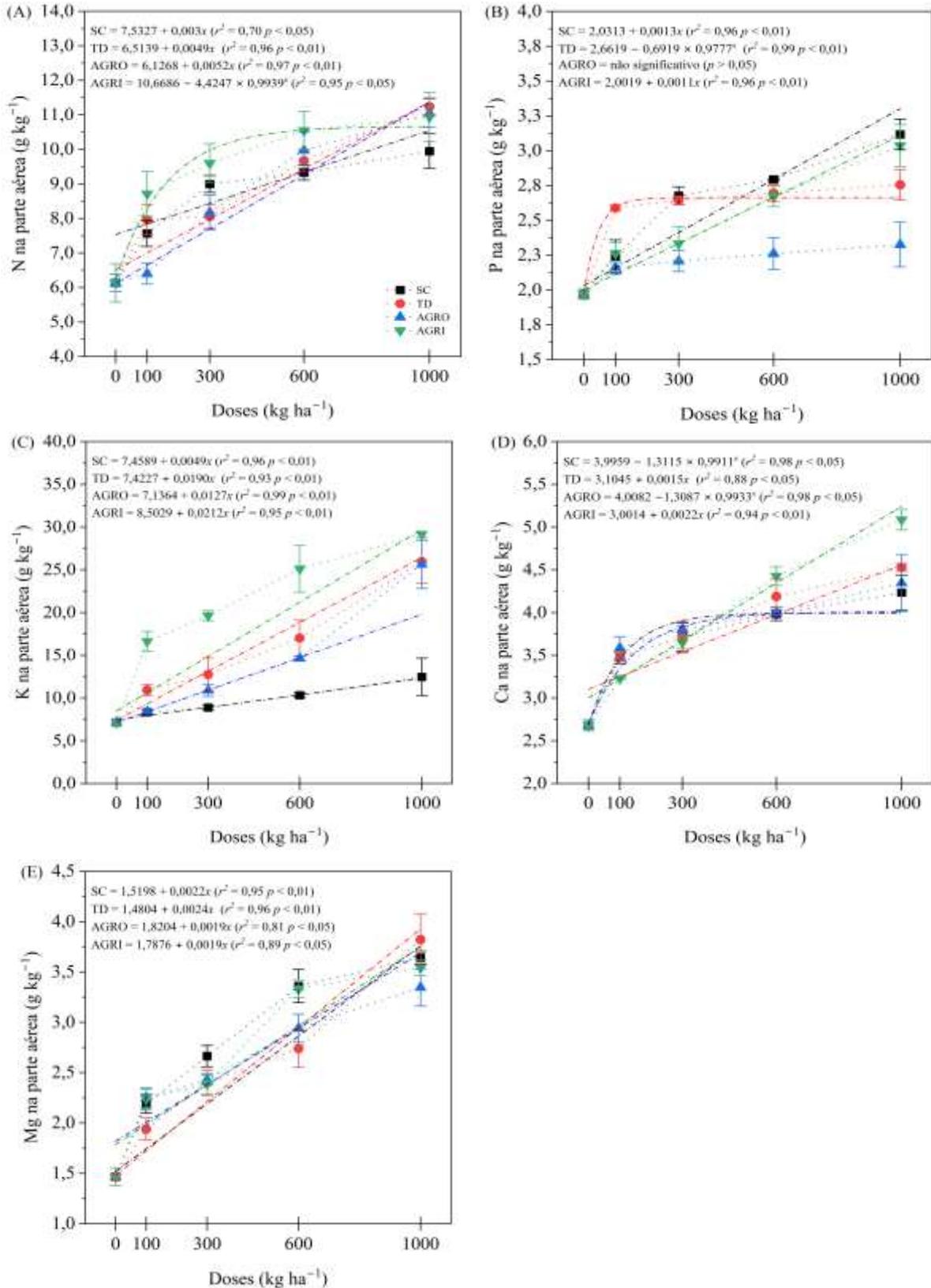
A capacidade do fertilizante SC em fornecer Si enquanto aumenta significativamente o pH do solo, resultando na redução da reação do Si com Al³⁺ trocável, é proposta como uma explicação para sua absorção de Si pela parte aérea a partir desta fonte, contribuindo para o

aumento da biomassa (KEEPING, 2017). Em estudo com plantas de gerbera, a suplementação de Si aumentou parâmetros de crescimentos em condições de déficit hídrico, aumentando em 29% o comprimento do caule, 22% diâmetro da flor, 24% peso fresco da planta sob condições controladas e em 17% em condições de estresse. Essa tendência foi a mesma para o peso seco da planta, aumentando em 38% com 100% FC (AHSAN et al., 2023). A altura da planta, diâmetro do colmo, biomassa da parte aérea e raízes foram significativamente influenciados pela aplicação das doses crescentes dos fertilizantes silicatados. A melhoria do crescimento das plantas mediadas pelo Si não só ocorre sob condições de estresse (AKRAM et al., 2010), mas também sob condições de ausência de estresse abiótico ou biótico, promovendo o crescimento das folhas de arroz, aveia e trigo, pela deposição de Si nas células endodérmicas das raízes, em células epidérmicas e tricomas das folhas (HOSSAIN et al., 2002).

4.4 Nutrientes na parte aérea e raízes de plantas de milho

Aplicação dos fertilizantes silicatados incrementou linearmente os nutrientes da parte aérea e raízes (Figura 6, 7, 8 e 9). A dose 1000 kg ha⁻¹ resultou em maior acúmulo significativo ($p < 0,01$ e $p < 0,05$) de macronutrientes e micronutrientes na parte aérea e raiz. Na parte aérea, a maior dose incrementou 59%, 82%, 77% e 77% de N; 57%, 42%, NS (não significativo) e 52% de P; 78%, 271%, 271% e 314% de K; 57%, 66%, 59% e 88% Ca; 164%, 171%, 135% e 157% de Mg, de macronutrientes, respectivamente, dos fertilizantes SC, TD, AGRO e AGRI (Figura 6 A, B, C, D e E).

Figura 6. Teores médios (\pm desvio padrão) de macronutrientes N, P, K Ca e Mg na parte aérea de plantas de milho cultivadas em solo fertilizado com fontes de silício, previamente tratado com calcário. $p < 0,01$ significativo a 1% de probabilidade pela ANOVA; $p < 0,05$ significativo a 5% de probabilidade pela ANOVA.



Ao aumentar a disponibilidade do Si no solo, a absorção de outros cátions na parte aérea das plantas aumentou (Figura 6 e 7). Esse aumento significativo na concentração de macronutrientes nas plantas se deve pelo fato das fontes de Si aumentarem a produção de exsudatos radiculares e superfícies radiculares que contribuem para essa absorção (ABDELRASHEED et al., 2021). O uso do Si aumentando o acúmulo de nutrientes em plantas vem sendo documentado por diversos autores (GREGER, 2018; NASCIMENTO et al., 2019; OLIVA et al., 2021; XU et al., 2020; GALINDO et al., 2020; GOKAVI et al., 2021).

As concentrações de N nas folhas tiveram um aumento linear em resposta a maioria dos fertilizantes silicatados em comparação com o controle (Figura 6 A). A aplicação Si em combinação com N aumenta a capacidade fotossintética, a transpiração, a condutância estomática, a síntese de clorofila, além de melhorar a assimilação de N aumentando a concentração do elemento nas folhas (VICIEDO et al., 2017; GOU et al., 2020; PARECIDO et al., 2022). Melhor absorção de N também foi relatada para outras plantas, como arroz (SINGH; SINGH, 2005) e trigo (NEU; SCHALLER; DUDEL, 2017).

A aplicação de fertilizante silicatado no solo sob cultivo de meloeiro aumentou as concentrações de macronutrientes e micronutrientes em 22, 13, 30, 105 e 100% os teores de N, K, Fe, Mn e Zn, respectivamente nas folhas (NASCIMENTO et al., 2019). Os resultados mostraram que a aplicação dos fertilizantes SC e AGRI causou um aumento linear nas concentrações de P na parte aérea, enquanto o fertilizante TD apresentou um aumento exponencial que se estabilizou nas maiores doses de Si (Figura 6 B). Embora a aplicação de Si possa melhorar o acúmulo P nas raízes, não foi observada remobilização para as folhas em nosso estudo para o fertilizante agrosilício, o que é consistente com os achados de Lozano-González et al. (2021). Nascimento et al. (2022) também encontraram aumento no teor de P na parte aérea do milho utilizando fertilizante a base de sílica amorfa. O fornecimento de Si induz alterações na estequiometria do carbono (C) e P na parte aérea (NEU et al., 2017 ; DEUS et al., 2020), aumentando a aquisição de nutrientes pelas raízes (BARRETO et al., 2017), desempenhando um papel na manutenção e crescimento das plantas sob baixa disponibilidade de P (SORATTO et al., 2019).

As concentrações de K, Ca e Mg na parte aérea das plantas tiveram aumento linear em resposta à aplicação da maioria dos fertilizantes silicatados, exceto para Ca que apresentou aumento exponencial que se estabilizou nas maiores doses de Si nos fertilizantes SC e AGRO (Figura 6). Efeitos positivos da aplicação de Si sobre o acúmulo de K também foram relatados por outros autores (SOBRAL et al., 2011; PATI et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2019; YAN et al., 2021; ALVES et al., 2024). Uma possível explicação para esse resultado é que o Si

estimula a remobilização do K vacuolar nas raízes, promovendo um aumento na translocação para a parte aérea (ALVES et al., 2024).

O impacto positivo do Si na absorção de K pode estar associado ao aumento da atividade de H⁺-ATPase, que está diretamente envolvida na absorção de potássio pelas plantas (DOS SANTOS et al., 2021) ou regulação de genes K⁺ transportador, ou seja, OsHAK5, OsAKT1 e OsSKOR por Si (YAN et al., 2021). Os resultados desse trabalho, mostraram um aumento da concentração de K na parte aérea, sob condições de temperatura elevada na casa de vegetação, sob aplicação de fertilizantes silicatados (Figura 5C).

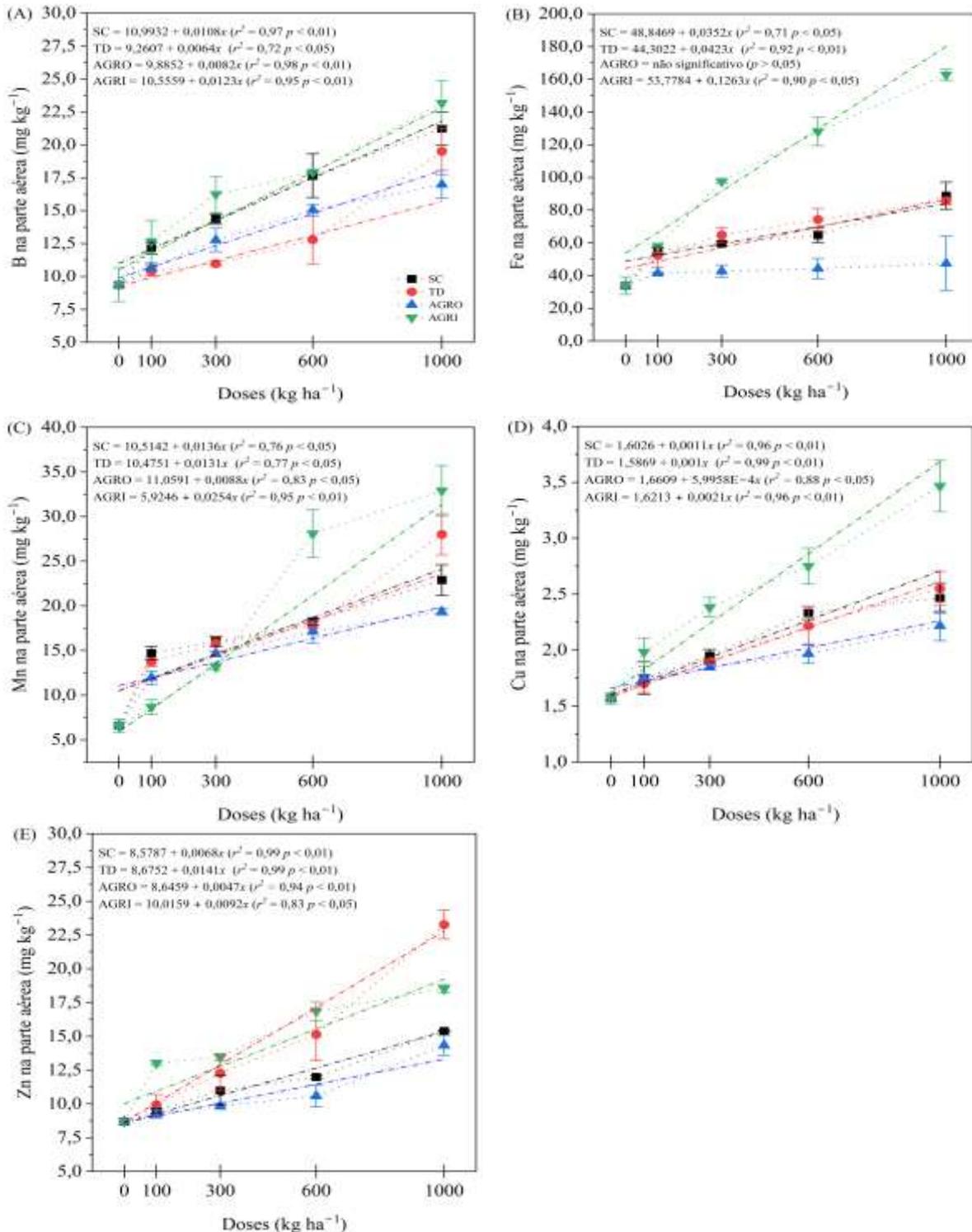
O Si pode afetar positivamente a absorção de macronutrientes (K, P, Ca e Mg) e micronutrientes (Mn, B, Zn e Cu) (PAVLOVIC et al., 2021). Fertilizantes contendo Si tem demonstrado aumentar a eficiência de uso de Ca em diversas espécies de plantas (MALI; AERY, 2008b; GOTTARDI et al., 2012 ; GREGER et al., 2018). O cálcio é um constituinte crucial da estrutura celular e está presente na parede celular como pectatos de cálcio. A ligação de íons Ca²⁺ aos pectatos está envolvida na regulação proporcionando firmeza (IDOUDI et al., 2024). Desta forma, uma redução no nível de Ca pode resultar em uma diminuição da firmeza (HEPLER; WINSHIP, 2010). O efeito positivo do Si atribuído ao crescimento e desenvolvimento das plantas pode estar ligado ao seu envolvimento estrutural nos componentes da parede celular (BUHELDT et al., 2020). O Si pode também ser complexado com certos polímeros celulares estruturais, como pectina e calose (BOYLSTON et al., 1990).

Na parte aérea da planta o Mg respondeu positivamente à aplicação de Si (Figura 6 E). Idoudi et al. (2024) encontraram concentrações de Mg em caules e raízes que excederam o nível de controle em 0,5 mmol L⁻¹ Si, aumentando em 13% e 74%, respectivamente, em comparação com as plantas com deficiência de Fe. Isso demonstra que a aplicação Si melhora a aquisição, absorção e translocação de Mg nas plantas (SHEN et al., 2009; REBOREDO et al., 2013), o que é consistente com os resultados encontrados em nosso estudo.

A adição de Si aumentou significativamente as concentrações de B, Fe, Mn, Cu e Zn na parte aérea ($p < 0,01$; $p < 0,05$) (Figura 7 A, B, C, D e E). A maior dose de fertilizante incrementou os teores em 123%, 105%, 78% e 142% de B; 169%, 160%, NS e 390% de Fe; 221%, 295%, 171% e 367% de Mn; 53%, 59%, 38% e 115% de Cu; 77%, 164%, 64% e 114% de Zn na parte aérea, respectivamente, para os fertilizantes SC, TD, AGRO e AGRI (Figura 7 A, B, C, D e E). De modo geral, o papel do Si no transporte de micronutrientes das raízes para a parte aérea pode estar relacionado ao aumento da concentração de citrato, o que tornaria a redistribuição de micronutrientes mais eficaz (HERNANDEZ-APAOLAZA, 2014). Esse fato

pode explicar por que os tratamentos com Si aumentaram as concentrações dos micronutrientes na parte aérea das plantas de milho.

Figura 7. Teores médios (\pm desvio padrão) de micronutrientes B, Fe, Mn, Cu e Zn na parte aérea de plantas de milho cultivadas em solo fertilizado com fontes de silício, previamente tratado com calcário. $p < 0,01$ significativo a 1% de probabilidade pela ANOVA; $p < 0,05$ significativo a 5% de probabilidade pela ANOVA.



Os resultados para B podem ser atribuídos à concorrência dentro do sistema de transporte de Si, favorecendo a absorção de B, devido às semelhanças químicas entre os elementos (CELIKKOL AKCAY E ERKAN, 2016). Até o momento, poucos estudos foram realizados para avaliar minuciosamente o impacto do Si na absorção e acúmulo de ferro na parte aérea de plantas de milho. Aplicação de Si está diretamente associada ao aumento de ácidos orgânicos como citrato e malato no xilena, para promover o transporte de Fe (BITYUTSKII et al., 2014; ZHANG et al., 2019). Por essa razão, o citrato é extremamente importante tanto para o transporte de ferro de longa distância, quanto para sua utilização nas folhas (IDOUDI et al., 2024).

Estudo em mudas de soja com a aplicação de diferentes doses de Si e um teor de Zn deficiente, observou-se um acúmulo amplamente maior do elemento nas folhas, sugerindo um papel positivo de Si no transporte Zn dentro da planta em condições não estressantes (PASCUAL et al., 2016). Os autores relataram que ambos os elementos apresentam um local semelhante dentro da planta, favorecendo uma ação coordenada.

No estudo, a adição de Si aumentou os níveis Cu nos tecidos da parte aérea das plantas (Figura 7 D). Isso ocorre devido ao aumento da capacidade de ligação da parede celular e à produção de moléculas que se ligam aoCu, tanto nas raízes quanto nos brotos das plantas (PAVLOVIC et al., 2021).

Os depósitos de Si formados nas paredes celulares aumentaram os locais de ligação ao Cu e, assim, diminuíram o impacto do alto nível de Cu nas células vegetais (LI et al., 2008). O Si reduziu os sintomas de toxicidade de Cu em *Erica andevalensis*, diminuindo a translocação de Cu das raízes para os brotos, e também por imobilizar ou desativar Cu nos fitólitos nas folhas (OLIVA et al., 2011). Porém, o Si pode diminuir a concentração de Cu estando em excesso ou não, aumentando a absorção de outros micronutrientes, como Mn e Zn.

Nas raízes, foi observado aumento de 60%, 38%, 60% e 38% de N; 45%, 30%, 33% e 48% de P; 70%, 70% 50% e 36% de K; 115%, 84%, 100% e 84% de Ca; 35%, 44%, 33% e 42% de Mg de macronutrientes, respectivamente, dos fertilizantes SC, TD, AGRO e AGRI (Figura 8 A, B, C, D e E), 300%, 633% 622% e 733% de B; 233%, 66%, 50% e 150% de Fe, 212%, 207%, 194% e 118% de Mn; 62%, 90%, 61% e 85% de Cu; 70%, 41%, 52% e 38% de Zn de micronutrientes respectivamente dos fertilizantes SC, TD, AGRO e AGRI (Figura 9 A, B, C, D e E). Ao comparar os teores dos nutrientes entre as diferentes partes da planta, foi possível observar que o Si aumentou a concentração de Ca nas raízes (Figura 8 D), N, P, K e Mg na parte aérea (Figura 6 A, B, C e E). Além disso, nas raízes, o Si aumentou a concentração

de Cu e B (Figura 9 A e D). Por outro lado, na parte aérea da planta, houve um aumento na concentração de Fe, Zn e Mn (Figura 7 B, C e E).

Figura 8. Teores médios (\pm desvio padrão) de macronutrientes N, P, K Ca e Mg nas raízes de plantas de milho cultivadas em solo fertilizado com fontes de silício, previamente tratado com calcário. $p < 0,01$ significativo a 1% de probabilidade pela ANOVA; $p < 0,05$ significativo a 5% de probabilidade pela ANOVA.

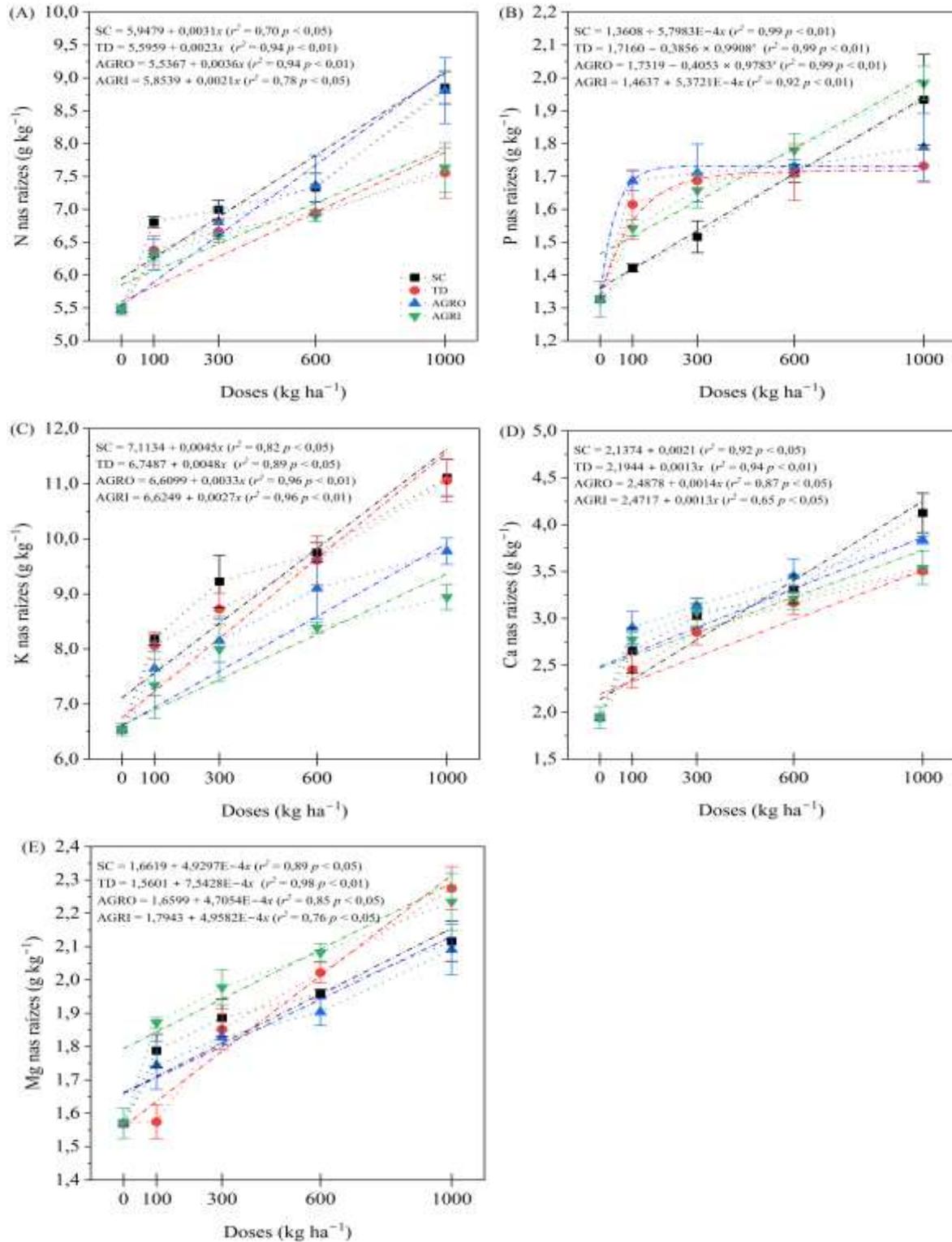
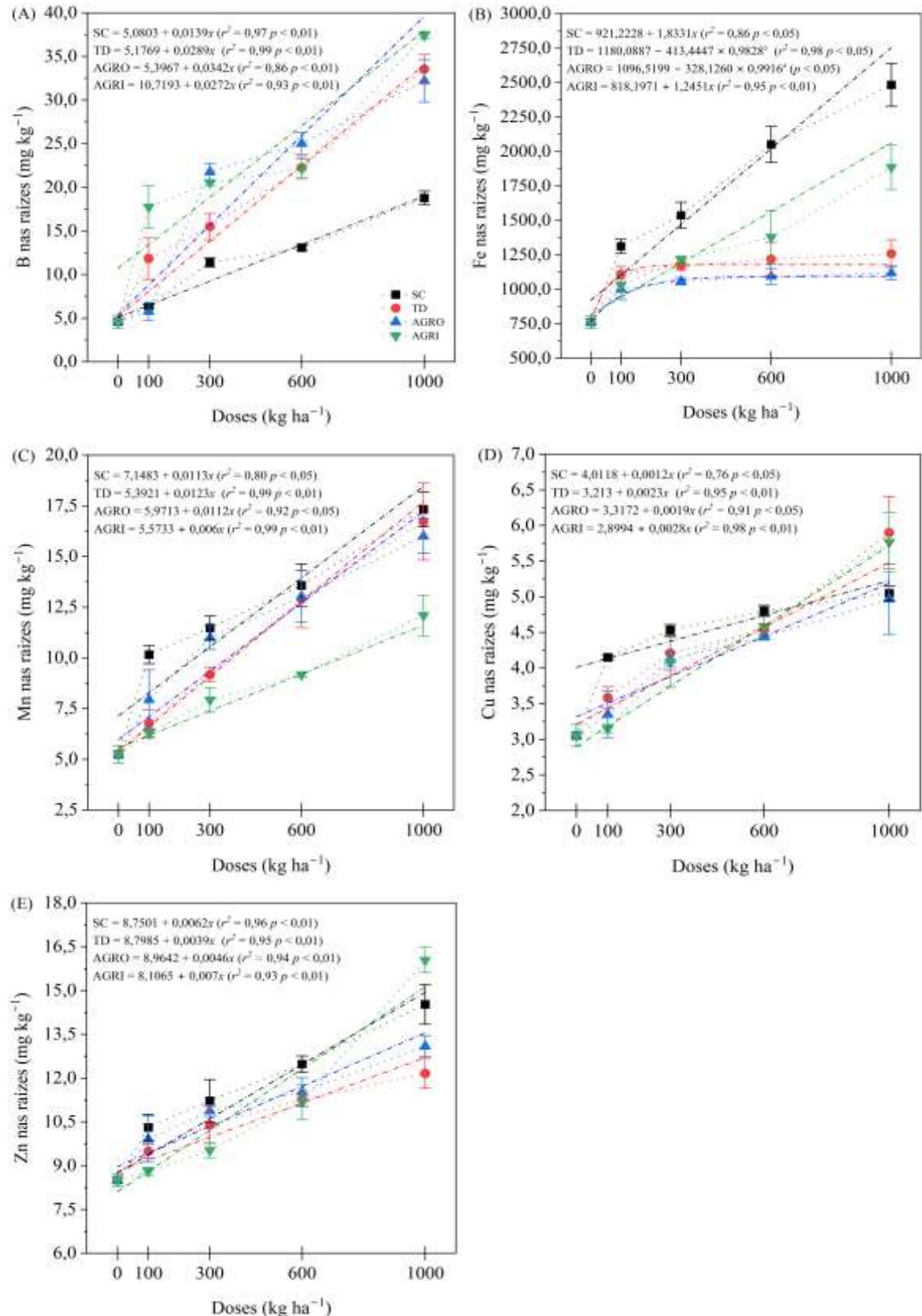


Figura 9. Teores médios (\pm desvio padrão) de micronutrientes B, Fe, Mn, Cu e Zn nas raízes de plantas de milho cultivadas em solo fertilizado com fontes de silício, previamente tratado com calcário. $p < 0,01$ significativo a 1% de probabilidade pela ANOVA; $p < 0,05$ significativo a 5% de probabilidade pela ANOVA.



Esses resultados indicam que mudanças ativadas por Si no desenvolvimento dos tecidos radiculares podem desempenhar um papel significativo na regulação da absorção, concentração e distribuição de nutrientes nas plantas. Além disso, o Si tem a capacidade de influenciar a formação de barreiras apoplasmáticas nas raízes, regulando as vias apoplasmáticas e monitorando a translocação através do apoplasma radicular para a parte aérea (VACULÍK et al., 2012; VACULÍKOVÁ et al., 2016)

A atenuação mediada pelo Si da deficiência de Ca em repolho (*Brassica oleracea* var. capitata) cultivado em hidroponia, revelou um padrão de interação entre esses elementos. Quando o repolho tinha Ca suficiente, a adição de Si reduziu o acúmulo de cálcio nas partes aéreas, mas aumentou nas raízes. No entanto, em repolhos com deficiência de cálcio, a adição de silício aumentou o acúmulo de cálcio nas partes aéreas, mas não afetou o acúmulo nas raízes (DA SILVA et al., 2021), corroborando nossos resultados.

Boro é fortemente afetado pelo Si, pois ambos os elementos compartilham semelhanças e vias químicas, na forma de ácidos salicílico e bórico (WIESE; NIKOLIC; ROMHELD, 2007). Como B é pouco translocado na planta e muito exigido nas regiões meristemáticas das raízes, onde são sintetizadas as auxinas (BARBER, 1995), faz-se necessária a absorção nessa região específica da raiz. O Si também induz o acúmulo de Cu nas células epidérmicas da raiz, limitando assim a translocação de Cu da raiz para a parte aérea em plântulas de trigo (*Triticum turgidum*) (KELLER et al., 2015). No pepino, o fornecimento de Si aumentou a capacidade de ligação Cu da parede celular da raiz, bem como o acúmulo de ligantes de Cu como ácidos orgânicos (citrato e malato nas raízes e aconitadas nas folhas) e aminoácidos (nicotianamina e histidina) nas folhas (BOSNIC et al., 2019 a,b).

6 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que os fertilizantes silicatados diferem quanto a capacidade de fornecer Si no solo e aumentar a biomassa das plantas de milho. A aplicação dos fertilizantes SC e AGRO promoveu aumento proporcional de Si no solo com aumento das doses, enquanto o fertilizante TD apresentou aumento na disponibilidade de Si até a dose 300 kg ha⁻¹. A dose 600 kg ha⁻¹ do fertilizante AGRO mostrou ser agronomicamente mais viável, pelo efeito positivo nas características biométricas, acúmulo de Si e nutrição de plantas de milho. A fertilização silicatada incrementou o acúmulo de Si e nutrientes (N, P, K, Ca, Fe, Zn, Cu, Mg, Mn e B) na parte aérea e raízes de plantas de milho, além de promoveram incrementos da altura, diâmetro e biomassa da parte aérea e raízes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAPFCO. (2018). **Official Publication of the Association of American Plant Food Control Officials**. AAPFCO.

ABDELRASHEED, K. G.; MAZROU, Y.; OMARA, A. E. D.; OSMAN, H. S.; NEHELA, Y.; HAFEZ, E. M.; RADY, A. M. S.; EL-MONEIM, D. A.; ALOWAIESH, B.F.; GOWAYED, S. M. Soil amendment using biochar and application of K-humate enhance the growth, productivity, and nutritional value of onion (*Allium cepa* L.) under deficit irrigation conditions. **Plants**, v. 10, , p. 2598, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10122598>

ADREES, M.; ALI, S.; RIZWAN, M.; IBRAHIM, M.; ABBAS, F.; FARID, M.; ZIA-UR-REHMAN, M.; IRSHAD, M. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 119, n. 11, p. 186-197, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>

AGROSILÍCIO. **Agrosilício Corretivo de Acidez**. Disponível em: <<https://agrosilicio.com.br/agrosilicio-corretivo-de-acidez/>>. Acesso em: 10 janeiro 2024.

AHMED, M.; ASIF, M.; HASSAN, F. U. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. **Acta Physiologiae Plantarum**, Heidelberg, v. 36, n. 2, p. 473-483, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11738-013-1427-2>

AHSAN, M.; VALIPOUR, M.; NAWAZ, F.; RAHEEL, M.; ABBAS, H.T.; SAJID, M.; MANAN, A.; KANWAL, S.; MAHMOUD, E.A.; CASINI, R. Evaluation of Silicon Supplementation for Drought Stress under Water-Deficit Conditions: An Application of Sustainable Agriculture. **Agronomy**, v. 13, p. 599, 2023. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020599>

AKRAM, H. M.; SATTAR, A.; ALI, A.; NADEEM, M. A. Agro-physiological performance of wheat genotypes under moisture stress conditions. **Journal Agricola Research**, v. 48, n. 3, p. 361–368, 2010.

ALVES, D. M. R.; PRADO, R. M.; BARRETO, R. F. Silicon and sodium attenuate potassium deficiency in *Eruca sativa* Mill. **Food Chemistry**, v. 432, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137225>.

AMIN, M.; AHMAD, R.; BASRA, S. M. A.; MURTAZA, G. Silicon induced improvement in morpho-physiological traits of maize (*Zea Mays* L.) under water deficit. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 51, n. 1, p. 187–196, 2014.

AMOAKWAH, E.; SHIM, J.; KIM, S.; LEE, Y.; KWON, S.; SANGHO, J. P.; ARK, S. Impact of silicate and lime application on soil fertility and temporal changes in soil properties and carbon stocks in a temperate ecosystem. **Geoderma**, v. 433. p. 116431, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116431>.

ÁVILA, F.W.; BALIZA, D. P.; FAQUIN, V.; ARAÚJO, J. L.; RAMOS, S. J. Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 184-190, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000200003>

BALIEIRO, F. C.; ALVES, B. J. R. Nitrogênio total – Kjeldahl. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1995, p. 414.

BARRETO, F. R.; SCHIAVON JÚNIOR, A. A.; MAGGIO, M. A.; DE MELLO PRADO, R. Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Sci. Hortic**, v. 225, p. 743–750, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.014>

BITYUTSKII, N.; PAVLOVIC, J.; YAKKONEN, K.; MAKSIMOVIC, V.; NIKOLIC, M. Contrasting effect of silicon on iron, zinc and manganese status and accumulation of metal-mobilizing compounds in micronutrient-deficient cucumber. **Plant Physiol. Biochem**, v. 74, p. 205–211, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.11.015>.

BOSNIC, D.; BOSNIC, P.; NIKOLIC, D.; NIKOLIC, M.; SAMARDZIC, J. Silicon and iron differently alleviate copper toxicity in cucumber leaves. **Plants**, v. 8, p. 554, 2019a. <https://doi.org/10.3390/plants8120554>

BOSNIC, D.; NIKOLIC, D.; TIMOTIJEVIC, G.; PAVLOVIC, J.; VACULÍK, M.; SAMARDZIC, J. Silicon alleviates copper (Cu) toxicity in cucumber by increased Cu-binding capacity. **Plant Soil**, v. 441, p. 629–641, 2019b. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04151-5>

BOYLSTON, E. K.; HEBERT, J. J.; HENSARLING, T. P.; BRADOW, J. M.; THIBODEAUX, D. P. Role of silicon in developing cotton fibers. **Journal of Plant Nutrition**, v.13, p.131–148, 1990. <https://doi.org/10.1080/01904169009364063>

BRASIL. (2020). INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 61 , DE 08 DE JULHO DE 2020. Dispõe sobre as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 08 julh. 2020. Seção 2, p. 5.

BUHELDT, A. C.; TEIXEIRA, G. C. M.; OLIVEIRA, K. S.; ROCHA, A. M. S.; DE MELLO PRADO, R., CAIONE, G. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, p. 1532–1548, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00245-7>

CARVALHO, R; FURTINI NETO, A. E.; CURTI, N.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA JR, A. C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p.69-74, 2000.

CELIKKOL AKCAY, U.; ERKAN, I. E. Silicon induced antioxidative responses and expression of BOR2 and two PIP family aquaporin genes in barley grown under boron toxicity. **Plant Mol. Biol. Rep.** v. 34, p.318–326, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11105-015-0923-5>

DA SILVA, D. L.; PRADO, R. M.; TENESACA, L. F. L.; DA SILVA, J. L. F.; MATTIUZ, B. H. Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1770, 2021.

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-80934-6>

DALASTRA, C.; CAMPOS, A. R.; FERNANDES, F. M.; MARTINS, G. L. M.; CAMPOS, Z. R. Silício como indutor de resistência no controle do tripses do prateamento *Enneothrips flavens* Moulton, 1941 (Thysanoptera: Thripidae) e seus reflexos na produtividade do amendoimzeiro. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 35, n. 3, p. 531-538, 2011.

DAS, S.; GALGO, S. J. C.; JIMMY, M. A. A.; LEE, J. G.; HWANG, H. Y.; LEE, C. H.; KIM, P. J. Recycling of ferrous slag in agriculture: Potentials and challenges. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 6, p. 1 – 35, 2020.

<https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1853458>

DELSTANCHE, S.; OPFERGELT, S.; CARDINAL, D.; ELSASS, F. Silicon isotopic fractionation during adsorption of aqueous monosilicic acid onto iron oxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 73, p. 923-934, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.014>

DESHMUKH, R. K.; VIVANCOS, J.; GUÉRIN, V.; SONÁ, H.; LABBÉ, C.; BELZILE, F.; BELANGER, R. R. Identification and functional characterization of silicon carriers in soybean using comparative genomics of the main intrinsic proteins of *Arabidopsis* and rice. **Plant Molecular Biology**, v. 83, n. 45, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11103-013-0087-3>

DEUS, A. C. F.; PRADO, R. M.; ALVAREZ, R. C. F.; DE OLIVEIRA, R. L. L., FELISBERTO, G. Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon**, v. 12, p. 997–1005, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00195-5>

DIETZEL, M. Dissolution of silicates and the stability of polysilicic acid. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 64, p. 3275-3281, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00426-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00426-9)

DOS SANTOS, M. L.; NUNES, M. R.; GOMES, J. B. V.; MENEZES, R. S. C.; MARTINS, P. M. Tomate cultivado com substratos à base de resíduos de couro, coco e diatomita. **Revista Brasileira de Agricultura Urbana e Periurbana**, v. 11, n. 4, p. 1-14, 2021.

EPSTEIN, E. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. **Silicon**, v. 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FUHRS, H.; SPECHT, A.; ERBAN, A.; KOPKA, J.; HORST, W. J. Functional associations between the metabolome and manganese tolerance in *Vigna unguiculata*. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 1, p. 329–340, 2012. <https://doi.org/10.1093/jxb/err276>

GALINDO, F. S.; PAGLIARI, P. H.; BUZZETTI, S. Can silicon applied to correct soil acidity in combination with *Azospirillum brasilense* inoculation improve nitrogen use efficiency in maize? **Plos One**, v. 15, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230954>

- GOKAVI, N; JAYAKUMAR, M; MOTE, K; SURENDRAN, U. Diatomaceous Earth as a Source of Silicon and its Impact on Soil Physical and Chemical Properties, Yield and Quality, Pests and Disease Incidence of Arabica Coffee cv. **Chandragiri Silicon** v.13, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00767-w>
- GOMES COE, H.; OSTERRIETH, M.; FERNÁNDEZ HONAINÉ, M. Phytoliths and their applications. In: Gomes Coe, H., Osterrieth, M. (Eds.), *Synthesis of Some Phytolith Studies in South America (Brazil and Argentina)*. **Nova Science Publishers, Inc.**, p. 1–26, 2014.
- GOTTARDI, S.; IACUZZO, F.; TOMASI, N.; CORTELLA, G.; MANZOCCO, L.; PINTON, R. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. **Plant Physiol. Biochem.**, v. 56, p. 14–23, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.04.002>
- GOU, T.; YANG, L.; HU, W.; CHEN, X.; ZHU, Y.; GUO, J.; GONG, H. Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. **Plant Physiol. Biochem.** v. 152, p. 53–61, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.031>
- GREGER, M.; LANDBERG, T.; VACULÍK, M. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species. **Plants**, v. 7, n. 2, p. 41, 2018. <https://doi.org/10.3390/plants7020041>
- GUERRIERO, G.; HAUSMAN, J. F.; SYLVAIN, L. Silicon and the plant extracellular matrix. **Front Plant Sci.** v. 7, p. 463, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00463>
- GUNTZER, F.; KELLER, C.; MEUNIER, J. D. Benefits of plant silicon for crops: A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 32, n. 1, p. 201–213, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0039-8>
- HAYNES, R. J. Uma visão contemporânea da disponibilidade de silício em solos agrícolas. **J Plant Nutrition Solo Science**, v. 177, Ed. 6, 2014.
- HAYNES, R. J. What effect does liming have on silicon availability in agricultural soils? **Geoderma**, v. 337, p. 375–383, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.026>
- HEPLER, P.K.; WINSHIP, L. J. Calcium at the cell wall-cytoplasm interface. **J. Integr. Plant Biol.** v. 52, p. 147–160, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.00923.x>
- HERNANDEZ-APAOLAZA, L. Can silicon partially alleviate micronutrient deficiency in plants? A review. **Plant**, v. 240, n. 3, p. 447–458, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2119-x>
- HODSON, M. J.; WHITE, P. J.; MEAD, A.; BROADLEY, M. R. The role of silicon in biology. In: DATTA, S. K. et al. *Advances in rice research for abiotic stress tolerance*. **Singapore: Springer**, p. 149–158, 2005.
- HOSSAIN, M.T.; MORI, R.; SOGA, K.; WAKABAYASHI, K.; KAMISAKA, S.; FUJII, S.; YAMAMOTO, R.; HOSON, T. Growth promotion and an increase in cell wall extensibility by silicon in rice and some Other Poaceae seedlings. **Journal of Plant Research**, v. 115, p. 0023–0027, 2002. <https://doi.org/10.1007/s102650200004>

- IDOUDI, M.; SLATNI, T.; LAIFA, I.; RHIMI, N.; RABHI, M.; HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L.; ZORRIG, W.; ABDELLY, C. Silicon (Si) mitigates the negative effects of iron deficiency in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) by improving photosystem activities and nutritional status. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 206, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108236>
- ILER, R. K. The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry. John Wiley and Sons Ltd., New York, 1979.
- JOHNSON, S. N.; CHEN, Z.; ROWE, R. C.; TISSUE, D. T. Field application of silicon alleviates drought stress and improves water use efficiency in wheat. **Frontiers in Plant Science**, p. 13, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1030620>
- KEEPING, M. G. Uptake of Silicon by Sugarcane from Applied Sources May Not Reflect Plant-Available Soil Silicon and Total Silicon Content of Sources. **Journal Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017a. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00760>
- KELLER, C.; RIZWAN, M.; DAVIDIAN, J. C.; POKROVSKY, O. S.; BOVET, N.; CHAURAND, P. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 mM Cu. **Plants**, v. 241, p.847–860, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2220-1>
- KHAN, I.; AWAN, S. A.; RIZWAN, M.; ALI, S.; HASSAN, M. J.; BRESTIC, M.; ZHANG, X.; HUANG, L. Effects of silicon on heavy metal uptake at the soil-plant interphase: a review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 222, 2021a. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112510>
- KHAN, M. I. R.; ASHFAQUE, F.; CHHILLAR, H.; IRFAN, M.; KHAN, N. A. The intricacy of silicon, plant growth regulators and other signaling molecules for abiotic stress tolerance: an entrancing crosstalk between stress alleviators. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 162, p. 36-47, 2021b. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.024>
- KNIGHT, C. T. G.; KINRADE, S. D. A primer on the aqueous chemistry of silicon. **Studies in Plant Science**, v. 8, p. 57–84, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80008-2](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80008-2)
- KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V.A.; CORRÊA, G.F.; SNYDER, G.H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 635-641, 1999.
- KORNDÖRFER, G. H.; LATERZA, F.; PEREIRA, H. S. **Análise de silício disponível em solos**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 157-160, 2004.
- KORUNIC, Z.; ROZMAN, V.; LIŠKA, A.; LUCIĆ, P. A review of natural insecticides based on diatomaceous earths. **Poljoprivreda**, v. 22, p. 10-18, 2016. <https://doi.org/10.18047/poljo.22.1.2>
- LANA, R. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; SILVA, A. F.; LANA, A. M. Q. Efeito do silicato de cálcio sobre a produtividade e acumulação de silício no tomateiro. **Biosci. J.**, v. 19, p. 15 -20, 2003.

- LEE, Y. B.; KIM, P. J. Reduction of phosphate adsorption by ion competition with silicate in soil. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, v. 26, n.4, p. 286-296, 2007. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2007.26.4.286>
- LI, J.; LEISNER, S.M.; FRANTZ, J.. Alleviation of copper toxicity in *Arabidopsis thaliana* by silicon addition to hydroponic solutions. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 133, n. 5, p. 670-677, 2008. <https://doi.org/10.21273/JASHS.133.5.670>
- LI, M.; WANG, Q.; LIU, Z.; PAN, X.; ZHANG, Y. Silicon application and related changes in soil bacterial community dynamics reduced ginseng black spot incidence in *Panax ginseng* in a short-term study. **BMC Microbiol.** v.19, n. 263, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1627-z>
- LI, R.; SUN, Y.; WANG, H.; WANG, H. Avanços na Compreensão dos Transportadores de Silício e os Benefícios da Resistência a Doenças Associadas ao Silício nas Plantas. **Ciências Aplicadas**, v. 12, n. 7, p. 3282, 2022. <https://doi.org/10.3390/app12073282>
- LIANG, Y. C.; SUN, W. C.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, v. 147, n. 2, p. 422–428, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- LIANG, Y.; ZHU, J.; Li, Z.; CHU, G.; DING, Y.; ZHANG, J.; SUN, W. Role of silicon in enhancing resistance to freezing stress in two contrasting winter wheat cultivars. **Environmental and Experimental Botany**, v. 64, n. 3 p. 286-294, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.06.005>
- LINDSAY, W.L.; NORVELL, W.A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. **Soil Sci Soc Amer J**, v. 42, p. 421–428, 1978.
- LOZANO-GONZÁLEZ, J. M.; VALVERDE, C.; HERNÁNDEZ, C. D.; MARTIN-ESQUINAS, A.; HERNÁNDEZ- APAOLAZA, L. Beneficial effect of root or foliar silicon applied to cucumber plants under different zinc nutritional statuses. **Plants**, v. 10, p. 2602, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10122602> .
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 10, p. 660-668, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>
- MA, J. F.; YAMAJI, N .A cooperative system of silicon transport in plants. **Trends in Plant Science**, v. 20, n. 7, p. 435–442, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.04.007>
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, v.65, n.19, p.3049-3057, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00018-008-7580-x>
- MAJUMDAR, S.; PRAKASH, N, B. Relationship of Properties of Rice and Sugarcane Soils and Plant Available Silicon in Karnataka, South India. **Silicon**. v. 14, p. 5647–5660, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01350-7>
- MALI, M.; AERY, N. C. Influence of silicon on growth, relative water contents and uptake of silicon, calcium and potassium in wheat grown in nutrient solution. **J. Plant Nutr.** v. 31, p. 1867–1876, 2008b. <https://doi.org/10.1080/01904160802402666>

- MAPA. (2020). Instrução Normativa nº 75, de 30 de dezembro de 2020. Estabelece o Regulamento Técnico para Produtos Fertilizantes, a partir de fontes minerais, orgânicas, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura e à jardinagem. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 dez. 2020. Seção 1, p. 86-113.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **London: Academic Press**, 1995.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of Plant Nutrition**. Worblaufen-Bern, Switzerland: International Potash Institute, 1987.
- MIRANDA, P. S.; MORAES, T. R.; SANTOS, J. R. E.; CARVALHO, F. D.; VIANA, J. P.; PÉREZ-MALUF, R. Aplicação de silício na cultura do milho. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v. 16, n. 1, p. 1–6, 2018. <https://doi.org/10.5327/rcaa.v16i1.1853>
- MIYAZAWA, M.; PAVA, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 191-224, 2009.
- NASCIMENTO, C. W. A.; DE SOUZA NUNES, G. H.; PRESTON, H. A. F.; DA SILVA, F. B. V.; PRESTON, W.; LOUREIRO, F. L. C. Influence of Silicon Fertilization on Nutrient Accumulation, Yield and Fruit Quality of Melon Grown in Northeastern Brazil. **Silicon**, p. 1-7, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00187-5>.
- NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; ARAUJO, P. R. M.; ARAUJO, J. C. T.; LINS, S. A. S. Efficiency and recovery index of silicon of a diatomaceous Earth-based fertilizer in two soil types grown with sugarcane and maize. **Journal of plant nutrition**, v. 44, n. 16, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1918157>
- NEU, S.; SCHALLER, J.; DUDEL, G. D. Silicon availability modifie nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L). **Sci Rep** v. 7, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep40829>
- NIKOLIC, D.B.; NESIC, S.; BOSNIC, D.; KOSTIC, L.; NIKOLIC, M.; SAMARDZIC, J.T. Silicon alleviates iron deficiency in barley by enhancing expression of strategy II genes and metal redistribution. **Front. Plant Sci.** v. 10, p. 416, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00416>
- NOJOSA, G. B. A.; RESENDE, M. L. V.; RESENDE, A. V. **Uso de fosfitos e silicatos na indução de resistência**. In: CAVALCANTI, L.S.; DI PIERO, R.M.; CIA, P.; PASCHOLATI, S.F.; RESENDE, M.L.V.; ROMEIRO, R.S (Orgs.). Indução de resistência em plantas a patógenos e insetos. Piracicaba: FEALQ, 2006.
- OLIVA, K. M. E.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M. Biomass and concentration of nutrient and silicon in sugarcane grown on soil fertilized with diatomite. **Revista Brasileira Ciências Agrárias**, v. 15, 2020. <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8755>

- OLIVA, K. M. E.; SILVA, F. B. V.; ARAÚJO, P. R. M.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A. Amorphous Silica-Based Fertilizer Increases Stalks and Sugar Yield and Resistance to Stalk Borer in Sugarcane Grown Under Field Conditions. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 21, p. 543, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00543-8>.
- OLIVA, S. R.; MINGORANCE, M. D.; LEIDI, E. O. Effects of silicon on copper toxicity in *Erica andevalensis* Cabezudo and Rivera: a potential species to remediate contaminated soils. **Journal of Environmental Monitoring**, n.13, p. 591–596, 2011. <https://doi.org/10.1039/c0em00549e>
- PAIM, L. A.; CARVALHO, R.; ABREU, C.M.P; GUERREIRO, M.C. Estudo dos efeitos do silício e do fósforo na redução da disponibilidade de metais pesados em área de mineração. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, p. 28-33, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000100007>
- PARECIDO, R, J; SORATTO, R, P; PERDONÁ, M, J; GITARI, H, I. Foliar-applied silicon may enhance fruit ripening and increase yield and nitrogen use efficiency of Arabica coffee. **European Journal of Agronomy**. v. 140, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126602>
- PASCUAL, M.B.; ECHEVARRIA, V.; GONZALO, M.J.; HERNÁNDEZ-APAOLAZA, L. Silicon addition to soybean (*Glycine max L.*) plants alleviate zinc deficiency, **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 108, p. 132-138, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.07.008>
- PATI, S.; PAL, B.; BADOLE, S.; HAZRA, G. C.; MANDAL, B. Effect of silicon fertilization on growth, yield, and nutrient uptake of rice. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.47, n.3, p. 284–290, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2015.1122797>.
- PAVLOVIC, J.; KOSTIC, L.; BOSNIC, P.; KIRKBY, E. A.; NIKOLIC, M. Interactions of silicon with essential and beneficial elements in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 2021. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.697592>
- PEREIRA, H. J. S.; KORNDORFER, G. H.; MOURA, W. F.; CORRÊA, G. F. Extratores de silício disponível em escoria e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, Vicoso, v.27, n. 2, p. 265 – 274, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000200007>
- PONCE, F.; MACHADO, D.; DIPPLE, F.; DALLACORT, R.; SEABRA, S. Adubação silicatada na produtividade e respostas fisiológicas das plantas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.37926>
- PRAKASH, N. B.; ANITHA, M. S.; SANDHYA, K. Behaviour of different levels and grades of diatomite as silicon source in acidic and alkaline soils. **Silicon**, v. 11, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12633-015-9373-9>
- PRENTICE, P. Efficacy of silica in increasing fields in Marocco. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SILICON IN AGRICULTURE, 7th, 2017, India. **Proceedings of the 7th International Conference on Silicon in Agriculture**. Bengalore: University of Agricultural Sciences (UAS), p. 107, 2017.

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 Ciências do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1651-1659, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400030>

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2019.

RAMOS, L. A. **Reatividade de fontes de silício e sua eficiência na absorção e acumulação na cultura do arroz irrigado**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

REBOREDO, F.; LIDON, F.C.; PESSOA, F.; DUARTE, M.P.; SILVA, M.J. The uptake of macronutrients by an active silicon accumulator plant growing in two different substrata. **Emir. J. Food Agric**, v. 25, n. 12, p.9 86–993, 2013. <https://doi.org/10.9755/ejfa.v25i12.16>

REIS, M. C.; ANDRADE, B. B.; VASCONCELOS, G. R. Silicato de cálcio e magnésio no milho segunda safra: fitossanidade, fertilidade do solo e produtividade. **Revista do COMEIA**, v. 1, n. 1, 2019.

REIS, M. A.; ARF, O.; SILVA, M. G.; SÁ, M. E.; BUZETTI, S. Aplicação de silício em arroz de terras altas por aspersão. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v.30, n. 1, p. 37-43, 2008. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v30i1.1126>

RICHMOND, K. E.; SUSSMAN, M. Got Silicon? The Non-Essential Beneficial Plant Nutrient. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, p. 268-272, 2023. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00041-4)

RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon and plant disease. **Springer**, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0>.

ROUND, F. E.; CRAWFORD, R. M.; MANN, D. G. The diatoms: biology and morphology of the genera. Cambridge University Press. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 70, n. 4, p. 924-924, 1990. <https://doi.org/10.1017/S0025315400059245>

ROYCHOWDHURY, R.; KHAN, M. H.; CHOUDHURY, S. Physiological and Molecular Responses for Metalloid Stress in Rice—A Comprehensive Overview In: DATTA, S. K. et al. Advances in rice research for abiotic stress tolerance. **Singapore: Springer**, p. 51-61, 2018.

SANDHYA, K.; PRAKASH, N.; MEUNIER, J. D. Diatomaceous earth as a source of silicon in rice growth and yield in contrasting soils of South India. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, n. 18, p. 344-360, 2018. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005001201>

SANTOS, G.R.; CASTRO NETO, M. D.; CARVALHO, A. R. S.; FIDELIS, R. R.; AFFÉRI, F. S. Fontes e doses de silício na severidade do crestamento gomoso e produtividade da melancia. **Bioscience Journal** [online], v. 26, n. 2, p. 266–272, 2010.

SAVANT, N. K.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Depletion of plant-available silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 28, n. 13-14, p. 1245-1252, 1997.
<https://doi.org/10.1080/00103629709369870>

SCHALLER, J. WU, B.; AMELUNG, W.; HU, Z. Silicon as a potential limiting factor for phosphorus availability in paddy soils. **Scientific Reports.**, v. 12, 2022, Article 16329.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-20805-4>

SCHALLER, J.; PUPPE, D.; KACZOREK, D.; ELLERBROCK, R.; SOMMER, M. Silicon cycling in soils revisited. **Plants**, v. 10, n. 295, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10020295>

SCHALLER, J.; FAUCHERRE, S.; JOSS, H.; OBST, M.; GOECKEDE, M.; FRIEDRICH, B, P.; PEIFFER, S.; GILFEDDER, B.; ELBERLING, B. . Silicon increases the phosphorus availability of arctic soils. **Scientific Reports**, v. 9, p. 449, 2019.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-37104-6>

SHEN, X.; LI, J.; DUAN, L.; LI, Z.; ENEJI, A. E. Nutrient acquisition by soybean treated with and without silicon under ultraviolet-B radiation. **Journal of Plant Nutrition** , v. 32, n. 10, p. 1731–1743, 2009. <https://doi.org/10.1080/01904160903150966>

SILVA, J. V. R.; VELOSO, V.L.; SILVA, F. B. V. ; NASCIMENTO, C. W. A. Cadmium, silicon and nutrient accumulation by maize plants grown on a contaminated soil amended with a diatomaceous Earth fertilizer. **Ciência Rural**, v. 51, p. e20190804, 2021. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190804>.

SINGH, A, K.; SINGH, R.; SINGH, K. Growth, yield, and economics of rice (*Oryza sativa*) as influenced by level and time of silicon application. **Indian J Agron**, v. 50, p.190–193, 2005.

SOBRAL, M. F.; NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V.; FERREIRA, H. A.; SILVA, A. J.; SILVA, F. B. V. Basic slag and its effects on the concentration of nutrients and heavy metals in sugarcane. **Rev Bras Eng Agric Ambient**, v. 15, p. 867–862, 2011.

SOMMER, H.; LUTZ, C.; PLUMMER, L. N. Silicon - The Cinderella Element in Magmas? In: DREIBUS, G., HEWINS, R. H. & HOFMEISTER, W. (Eds.). Planetary and Meteorite Science. **Springer Berlin Heidelberg**, p. 223-241 , 2006.

SORATTO, R. P.; FERNANDES, A. M.; PILON, C.; SOUZA, M. R. Phosphorus and silicon effects on growth, yield, and phosphorus forms in potato plants. **J. Plant Nutr.** v. 42, p. 218–233, 2019. <https://doi.org/10.1080/01904167.2018.1554072>

SOUZA, J. P. F.; MARTINS, G. L. M.; PEREIRA, A. C.; BINOTTI, F. F. S.; MARUYAMA, W. I. Efeito de silicato de cálcio e magnésio no crescimento inicial de milho transgênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 2, n. 3, p.1 3-17, 2015.
<https://doi.org/10.32404/rean.v2i3.280>

SOYLEMEZOGLU, G.; DEMIR, K.; INAL, A.; GUNES, A. Efeito do silício na resposta antioxidante e estomática de dois porta-enxertos de videira (*Vitis vinifera* L.) cultivados em solo tóxico para boro, salino e salino tóxico para boro. **Scientia Horticulturae**, v.123, Ed. 2, p. 240–246, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.09.005>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

TUBAÑA, B. S.; BABU, T.; DATNOFF, L. E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. **Soil Science**, v. 181, n. 8, p. 393-411, 2016. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>

TUBAÑA, B. S.; HECKMAN, J. R. Silicon in Soils and Plants. In: *Silicon and Plant Diseases*. **Springer International Publishing**, p. 7 – 51, 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22930-0_2

VACULÍK, M.; LANDBERG, T.; GREGER M., LUXOVÁ, M.; STOLÁRIKOVÁ, M.; LUX, A. Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize plants. **Annals of Botany**, v. 110, Ed. 2, p. 433–443, 2012, <https://doi.org/10.1093/aob/mcs039>

VACULÍKOVÁ, M.; VACULÍK, M.; TANDY, S.; LUXOVÁ, M.; SCHULIN, R. Alleviation of antimonate (SbV) toxicity in maize by silicon (Si). **Environmental and Experimental Botany**, v. 128, p. 11-17, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.04.001>.

VAN BOCKHAVEN, J.; VLEESSCHAUWER, D.; HOFTE, M. Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: silicon leads the way. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 5, p. 1281-1293, 2013.

VENÂNCIO, J. B.; DIAS, N. S.; MEDEIROS, J. F.; MORAIS, P. L. D.; NASCIMENTO, C. W. A.; SOUSA NETO, O. N.; ANDRADE, L. M.; PEREIRA, K. T. O.; PEIXOTO, T. D. C.; ROCHA, J. L. A.; FERREIRA NETO, M.; SÁ, F. V. S. Effect of Salinity and Silicon Doses on Onion Post-Harvest Quality and Shelf Life. **Plants**, v. 11, p. 2788, 2022. <https://doi.org/10.3390/plants11202788>

VICIEDO, D. O.; PRADO, R. M.; TOLEDO, R. L.; SANTOS, L. C. N.; CALZADA, K. P. Response of radish seedlings (*Raphanus sativus* L.) to different concentrations of ammoniacal nitrogen in absence and presence of silicone. **Agron. Colomb**, v. 35, p. 198–204, 2017. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v35n2.62772>.

WHITE, A. C.; ROGERS, A.; REES, M.; OSBORNE, C. P. How can we make plants grow faster? A source–sink perspective on growth rate. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, p. 31- 45, 2016. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv447>.

WIESE, H.; NIKOLIC, M.; ROMHELD, V. The apoplast of higher plants: compartment of storage, transport and reactions. **Silicon in plant nutrition**. **Springer, Dordrecht**, p. 33-47, 2007. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5843-1>

XU, D.; GAO, T.; FANG, X.; BU, H.; LI, Q.; WANG, X.; ZHANG, R. Silicon addition improves plant productivity and soil nutrient availability without changing the grass:legume ratio response to N fertilization. **Sci Rep**, v.10, n.1, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67333-7>

YAN, G.; FAN, X.; ZHENG, W.; GAO, Z.; YIN, C.; LI, T.; LIANG, Y. Silicon alleviates salt stress-induced potassium deficiency by promoting potassium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). **J Plant Physiol**, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153379>.

ZHANG, C.; LI, L.; LOCKINGTON, D. Numerical study of evaporation-induced salt accumulation and precipitation in bare saline soils: mechanism and feedback. **Water Resources Research**, v. 50, p. 8084–8106, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013WR015127>

ZHANG, X.; ZHANG, D.; SUN, W.; WANG, T. The adaptive mechanism of plants to iron deficiency via iron uptake, transport, and homeostasis. **Int. J. Mol. Sci.** v.20, p. 2424, 2019. <https://doi.org/10.3390/ijms20102424>.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 455-472, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>