

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MODULAÇÃO DA HOMEOSTASE DE C:N:P E NA EFICIÊNCIA
DE USO DE NUTRIENTES NAS FOLHAS DA PLANTA INTEIRA DO MILHO**

Aluno: Ruan Carlos Pereira

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: MSc. Milton Garcia Costa

Jaboticabal
2025

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO NA MODULAÇÃO DA HOMEOSTASE DE C:N:P E NA EFICIÊNCIA
DE USO DE NUTRIENTES NAS FOLHAS DA PLANTA INTEIRA DO MILHO**

Ruan Carlos Pereira

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: MSc. Milton Garcia Costa

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP

1º Semestre/2025

P436s Pereira, Ruan Carlos
Silício na modulação da homeostase de c:n:p e na eficiência de uso de nutrientes nas folhas da planta inteira do milho / Ruan Carlos Pereira. -- Jaboticabal, 2025
35 p. : tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Renato de Mello Prado
Coorientador: Milton Garcia Costa

1. Nutrição das Plantas. 2. Milho. 3. Irrigação. 4. Silício. 5. Homeostase C:N:P. I. Título.

RUAN CARLOS PEREIRA

**SILÍCIO NA MODULAÇÃO DA HOMEOSTASE DE C:N:P E NA EFICIÊNCIA DE
USO DE NUTRIENTES NAS FOLHAS DA PLANTA INTEIRA DO MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientador: M.Sc. Milton Garcia Costa

Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Data da defesa: 14/02/2025

(X) Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 25/04/2025 17:22:29-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Renato de Mello Prado
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
KAMILA SILVA OLIVEIRA
Data: 28/04/2025 11:31:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

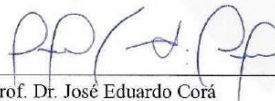
Dra. Kamilla Silva Oliveira
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
VANESSA QUAGLIARIELLO
Data: 28/04/2025 10:55:51-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

M.Sc. Vanessa Quagliariello
UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 29, 04, 2025



Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

Oferecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado e coorientador MSc. Milton Garcia Costa, por todo apoio, ensinamentos e paciência.

Agradecimentos

A elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso só foi possível graças ao apoio e dedicação de várias pessoas que, de diferentes maneiras, contribuíram para que essa etapa fosse alcançada. Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e proteção durante toda essa caminhada. Sem a fé e a presença divina em minha vida, nada disso teria sido possível.

Aos meus pais, Fátima Pipoli Pereira e Luís Carlos Pereira e ao meu irmão, Luís Carlos Pereira Junior que são minha base e maior inspiração, que sempre me ensinaram o valor do esforço, da honestidade e da perseverança. Vocês foram meu alicerce, acreditando em mim e me apoiando incondicionalmente em todos os momentos. Estendo também minha gratidão à minha família como um todo, por sempre estarem ao meu lado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado e coorientador MSc. Milton Garcia Costa, agradeço por todo o conhecimento transmitido, pela paciência em cada etapa deste trabalho e pelas valiosas contribuições que tornaram possível a realização deste projeto. Suas orientações foram fundamentais para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Aos meus amigos, que estiveram presentes nos momentos bons e difíceis, sempre oferecendo apoio, compreensão e boas risadas para aliviar as tensões. Vocês fizeram toda a diferença nessa jornada e tornaram o caminho mais leve e alegre.

A todos, deixo aqui minha mais profunda gratidão. Este trabalho também é um reflexo do que recebi de cada um de vocês.

Sumário

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
4. RESULTADOS	13
5. DISCUSSÃO	18
6. CONCLUSÃO	21
REFERÊNCIAS:.....	21

RESUMO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) é essencial para a segurança alimentar e energética global, mas enfrenta desafios especialmente associados a estresses abióticos, como a seca. Nesse contexto, o silício (Si) tem se mostrado um elemento benéfico, melhorando a resistência das plantas e promovendo maior eficiência no uso de nutrientes. Este estudo avaliou o impacto da aplicação de doses crescentes de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹) nas concentrações de Si, C, N e P nas folhas da planta inteira de milho, no acúmulo destes nutrientes, na homeostase de C:N:P e na eficiência de uso nutricional. O experimento foi realizado em blocos ao acaso, com fertirrigação de Si iniciada 20 dias após a emergência das plantas. Foram analisados parâmetros nutricionais. Os resultados mostraram que a fertirrigação com Si resultou em maior eficiência de uso de nutrientes, maior acúmulo nutricional, e modulações das relações estequiométricas das plantas. Conclui-se que a aplicação de Si otimiza o uso de nutrientes, melhora a resiliência da cultura do milho e promove a sustentabilidade agrícola. Esses resultados destacam o papel estratégico do Si em práticas agrícolas modernas, especialmente em sistemas tropicais.

Palavras-chave: Fertirrigação, Estequiometria, Sustentabilidade Agrícola

ABSTRACT

Maize (*Zea mays* L.) is essential for global food and energy security but faces challenges, particularly those associated with abiotic stresses such as drought. In this context, silicon (Si) has proven to be a beneficial element, enhancing plant resistance and promoting greater nutrient use efficiency. This study evaluated the impact of increasing Si doses (0, 4, 8, and 12 kg ha⁻¹) on Si, C, N, and P concentrations in whole-plant maize leaves, nutrient accumulation, C:N:P homeostasis, and nutritional use efficiency. The experiment was conducted in a randomized block design, with Si fertigation starting 20 days after plant emergence. Nutritional parameters were analyzed. The results showed that Si fertigation led to greater nutrient use efficiency, increased nutrient accumulation, and modulation of plant stoichiometric relationships. It is concluded that Si application optimizes nutrient use, enhances maize crop resilience, and promotes agricultural sustainability. These findings highlight the strategic role of Si in modern agricultural practices, especially in tropical systems.

Keywords: Fertigation, Stoichiometry, Agricultural Sustainability

1. INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays* L.) tem importância mundial devido a relevância na segurança alimentar e no abastecimento global, especialmente em países como o Brasil e os Estados Unidos, que se destacam sendo os maiores produtores e exportadores (Caldarelli; Bacchi, 2012; FAO, 2023). No entanto, com as mudanças climáticas como secas, enchentes e aumento da temperatura, podem comprometer a produtividade da cultura do milho (Jones; Thornton, 2021; Lobell; Field, 2007). Isso exige a implementação de práticas agrícolas mais sustentáveis conciliando a produtividade e a conservação ambiental.

Neste contexto, o silício (Si) tem emergido como um elemento-chave para o aprimoramento da resistência das plantas a estresses bióticos e abióticos, incluindo a seca, pragas e doenças (Santos et al., 2021; Lanna et al., 2021). Embora o Si não seja considerado um nutriente para as plantas, verifica-se grandes benefícios nas gramíneas, como o milho, devido à sua capacidade de ser absorvido pelas raízes na forma de ácido monossilícico (Si(OH)_4) e de ser translocado para as partes aéreas da planta, podendo acumular nas paredes celulares, formando fitólitos (Xu et al., 2023).

Esses fitólitos são estruturas microscópicas de sílica que contribuem para a rigidez estrutural das células, além de oferecerem resistência a estresses mecânicos e térmicos (Quigley; Anderson, 2014). Além disso, a presença de Si tem impacto na regulação da homeostase de nutrientes, como o carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P), otimizando a absorção e utilização desses elementos pelas plantas (Santos et al., 2021).

A maioria dos estudos com Si são realizados em condições de estresse,

mas também há benefícios encontrados em cultivos sem estresses. No entanto, poucos foram os estudos que buscaram compreender os benefícios do Si em plantas sem estresse.

Portanto, a hipótese a ser desvendada neste estudo é entender se o Si é capaz de induzir a homeostase de C:N:P e se é suficiente para incrementar a eficiência nutricional na cultura do milho. Para alcançar essa hipótese, este estudo teve o objetivo de avaliar o impacto das doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹) na homeostase de C:N:P e a eficiência nutricional das plantas de milho.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Produção da cultura do milho

A cultura do milho (*Zea mays* L.) desempenha um papel fundamental na segurança alimentar global, servindo como uma das principais fontes de calorias e nutrientes para a população humana e animal (Liu et al., 2023). O milho é uma planta originalmente do continente americano, cuja domesticação remonta a cerca de 9.000 anos, no sul do México, tendo suas evidências arqueológicas indicando que os primeiros cultivos foram desenvolvidos por povos indígenas da Mesoamérica, a partir de uma planta selvagem chamada *teosinto* (Sluyter; Dominguez, 2006).

É uma planta anual e gramínea da família *Poaceae*, seu ciclo pode variar de 90 a 120 dias, dependendo da variedade e das condições climáticas, requer temperaturas entre 21°C e 30°C para o seu desenvolvimento ideal, além de solos férteis e bem drenados (Magalhães; Durães, 2006).

A demanda pelo milho no Brasil e no mundo está fortemente ligada à indústria de rações, principalmente para aves e suínos, que compõem uma parte significativa das exportações agropecuárias (Caldarelli; Bacchi, 2012). Além disso, o crescimento da produção de etanol de milho tem ampliado o uso dessa cultura para fins energéticos, complementando o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar (Neves *et al.*, 2021). Nos Estados Unidos, cerca de 40% do milho produzido é utilizado para a produção de etanol, o que reflete a importância do milho também como matéria-prima para biocombustíveis (Khanna, *et al.*, 2024).

A produção de milho concentra-se em algumas regiões específicas, destacando-se os Estados Unidos, que representam cerca de 30% da produção global (FAO, 2023). O Brasil tem se consolidado como um dos maiores produtores de milho mundialmente, impulsionado pela adoção de tecnologias agrícolas, além do aprimoramento no manejo. Na safra 2023/2024, o Brasil alcançou uma produção de aproximadamente 115 milhões de toneladas produzidas em 21 milhões de hectares (CONAB, 2024), sustentado pela crescente demanda interna e externa, atendendo a diversos setores como a avicultura e suinocultura, além de servir como matéria-prima para a fabricação de etanol (CROP LIFE BRASIL, 2020). Externamente, as exportações são impulsionadas pela alta demanda global, beneficiadas pela menor concorrência nos portos no segundo semestre (AGROLINK, 2023).

No entanto, a produção de milho enfrenta constantes desafios devido a fatores climáticos imprevisíveis e variações nos recursos do solo (Chekole; *et al.*, 2023). O aumento da temperatura e a frequência de eventos climáticos

extremos, como secas e enchentes, afetam diretamente a produtividade agrícola (IPCC, 2022; Lobell; Field, 2007). Segundo Jones e Thornton (2021), o milho é particularmente sensível ao estresse hídrico e térmico, com projeções de diminuição da produtividade de até 15% em algumas regiões tropicais até 2050. A nutrição adequada desempenha um papel crucial na resposta do milho ao estresse hídrico, influenciando diretamente sua resiliência e produtividade (Jones; Thornton, 2021).

Estudos indicam que a deficiência hídrica pode reduzir significativamente a produção e a fertilidade do pólen, além de alterar o sincronismo de florescimento das inflorescências masculinas e femininas, comprometendo a polinização e, conseqüentemente, o número de grãos por espiga (Silva, 2019).

Todavia, sendo a agricultura uma das fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE), necessita de novas práticas agrícolas que resultem em maior retorno de C e que aumentem a estabilidade deste no solo ou que reduzam as perdas (Chowdhury et al., 2021).

A transformação na agricultura e na qualidade dos solos está ligada ao manejo adequado, envolvendo práticas como a rotação de culturas, plantio direto, manejo da fertilidade do solo e adubação equilibrada (Pittelkow et al., 2015). A entrada de biomassa no solo e a relação C/N do material que originará a matéria orgânica do solo (MOS) são os fatores decisivos que afetam o sequestro de C no solo (Chowdhury et al., 2021).

Por este motivo, o uso do Si tem ganhado destaque na agricultura, principalmente por seu papel de reduzir os danos provocados em condições estressantes, diminuindo a perda de biomassa das culturas (Carvalho et al.,

2022; Costa *et al.*, 2023; Sousa Junior *et al.*, 2021), conseqüentemente, permitindo maior entrada de biomassa no solo.

2.2 Absorção, transporte e acúmulo de silício nas plantas

O elemento Si desempenha um papel importante em diversas culturas, incluindo a cultura do milho, fazendo com que o Si influencie diretamente o desenvolvimento da planta e sua resistência a estresses bióticos e abióticos (Santos, *et al.* 2021). A forma prontamente disponível de Si no solo, é o ácido monossilícico (Si(OH)_4), oriundo, principalmente da decomposição de resíduos vegetais (Korndörfer; Souza, 2018). Por conseguinte, essa é a forma predominantemente de absorção de Si pelas raízes (Faquin, 2005).

O processo de absorção pode ser passivo, facilitado pelo fluxo de massa da água em plantas não acumuladoras (Santos, *et al.* 2021), ou pode ser ativo em plantas acumuladoras de Si. Esse processo é facilitado por transportadores específicos de Si, como Lsi1, que é um transportador de influxo de Si presente nas plantas que facilita a absorção de ácido monossilício pelas raízes por estar localizado na membrana plasmática de células da exoderme e endoderme das raízes, e o Lsi2, transportador de efluxo, localizado no lado proximal das células da exoderme e endoderme, promovendo o transporte desse elemento para o xilema, onde este será translocado para as partes aéreas da planta (Ma; Miyake; Takahashi, 2011).

A eficácia da absorção do elemento está ligada à concentração de Si no solo, à capacidade das raízes em absorver o ácido monossilícico e às circunstâncias de desenvolvimento da planta, como o valor de pH, a presença e

disponibilidade de outros elementos químicos (Castro, Crusciol, 2013; Santos, *et al.* 2021).

O transporte do Si que ocorre dentro da planta é um processo ativo nas plantas acumuladora de Si, como plantas de milho, pois o elemento é transportado para diferentes partes das plantas através do sistema vascular (Xu *et al.*, 2023), podendo diferenciar as plantas pelas suas capacidades de absorção pela presença ou ausência de transportes específicos de Si (Lsi1, Lsi2, Lsi3 e Lsi6) (Ma; Yamaji, 2015), que facilitam o transporte do ácido monossilícico através das membranas celulares.

As plantas podem ser classificadas em três grupos quanto à capacidade de absorção e acúmulo de silício (Si) em seus tecidos: acumuladoras ($> 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si), intermediárias ($5 \text{ a } 10 \text{ g kg}^{-1}$ de Si) e não-acumuladoras (menos de 5 g kg^{-1} de Si) (Ma, 2004). Entre as gramíneas, como milho, o teor de Si nos tecidos pode ser de 10 a 20 vezes maior do que nas eudicotiledôneas (Van Raij, 2011). Esse acúmulo significativo em gramíneas ocorre de forma ativa, por meio de transportadores de Si (Miyake; Takahashi, 1983), em plantas não-acumuladoras, como as eudicotiledôneas, absorvem o Si mais lentamente, levando a um aumento da concentração do elemento na planta (Adata; Besford, 1986).

Após a absorção, o Si é transportado pelo xilema e depositado principalmente nas paredes celulares na forma de fitólitos, contribuindo para a rigidez e elasticidade dos tecidos, especialmente em áreas de maior perda de água, como as folhas (Korndörfer; Souza, 2018). Este acúmulo de Si nas paredes celulares dos órgãos de transpiração, forma a dupla camada de sílica-

cutícula, levando há diminuição do processo de transpiração pelas plantas (Santos, *et al.* 2021). A formação desta camada protetora contribui, também para uma maior resistência mecânica das células, tornando as plantas mais resistentes ao ataque de pragas e doenças (Lanna *et al.*, 2021).

Além disso, a absorção de Si interfere na formação de fitólitos, estruturas microscópicas de sílica que se acumulam nos tecidos vegetais, reduzindo a necessidade de compostos ricos em C (a exemplo a lignina) para o fortalecimento da parede celular, o que aumenta a eficiência de uso de C nas plantas, pois conseguem alocar mais C para outras funções metabólicas e de crescimento, otimizando a fotossíntese e o crescimento vegetal (Liang *et al.*, 2006; Katz, 2021).

2.3 Papel do silício na homeostase C:N:P e na eficiência de uso dos nutrientes

O Si tem destaque na homeostase dos nutrientes C, N e P, embora não seja classificado como um nutriente, o Si potencializa a absorção e o transporte desses elementos, impactando de forma favorável o crescimento e o desenvolvimento vegetal (Santos, *et al.* 2021).

A formação dos fitólitos em plantas é diretamente influenciada pela presença de Si, que contribui para a rigidez estrutural da parede celular, diminuindo a necessidade de compostos orgânicos ricos em C para reforçar a estrutura celular (Katz *et al.*, 2021; Guerriero *et al.*, 2019). Dessa forma, as plantas que acumulam Si tendem a ser mais eficientes no uso de C, pois conseguem formar estruturas celulares mais robustas com uma menor

quantidade de C, o que, em última instância, pode contribuir para o aumento da massa seca das plantas (Mandlik et al., 2020).

O Si pode influenciar a taxa de fotossíntese, que também é crucial para a assimilação de C (LIANG et al., 2015; MA; YAMAJI, 2006). Segundo o estudo de Ghouri *et al* (2021), a aplicação de Si pode aumentar a produção de biomassa e a concentração de carboidratos em várias espécies de plantas.

Enquanto com relação ao N, a presença de Si aumenta a atividade da enzima nitrato redutase, fundamental para a assimilação de N, implicando na minimização da toxicidade do amônio (Mohanty, Nayak, Swain, *et al.*, 2020), o que pode levar a uma maior concentração de N nas plantas (Liu et al., 2020). Em relação ao P, o Si pode aumentar a sua disponibilidade no solo por facilitar a absorção deste nutriente devido à competição pelo sítio de absorção nos coloides, liberando-o na solução (Santos, *et al.* 2021). Além disso, segundo Singh *et al.* (2023) indicam que o Si pode melhorar a absorção de P nas plantas, ao modular a expressão de transportadores de fosfato, aumentando sua eficiência na absorção deste nutriente.

Essas modificações no metabolismo de N, P e C alteram as relações estequiométricas entre os elementos, resultando em uma nova homeostase nutricional nas plantas, contribuindo para a melhor utilização de recursos no ambiente, potencializando o sequestro de C e a adaptação a condições ambientais adversas, como salinidade e secas (Singh et al., 2023; Liu et al., 2020).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições experimentais

O experimento foi realizado em uma área experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV), localizada na Universidade Estadual Paulista (UNESP), em Jaboticabal, São Paulo (-22° 43' 30" de latitude e 47° 38' 00" de longitude e altitude de 546 metros) de maio de 2023 a setembro de 2023.

Durante do experimento foi realizado o monitoramento meteorológico da área experimental, por meio da umidade relativa, temperatura e radiação global (Figura 1). Os elementos meteorológicos utilizados neste trabalho, foram extraídos de um conjunto de dados pertencentes ao acervo da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas. As observações feitas na Estação Agroclimatológica do Campus de Jaboticabal foram cotadas, digitadas em formato padronizado, realizada a consistência e controle de qualidade. Em seguida foram obtidas as médias diárias que foram repassadas para o presente trabalho.

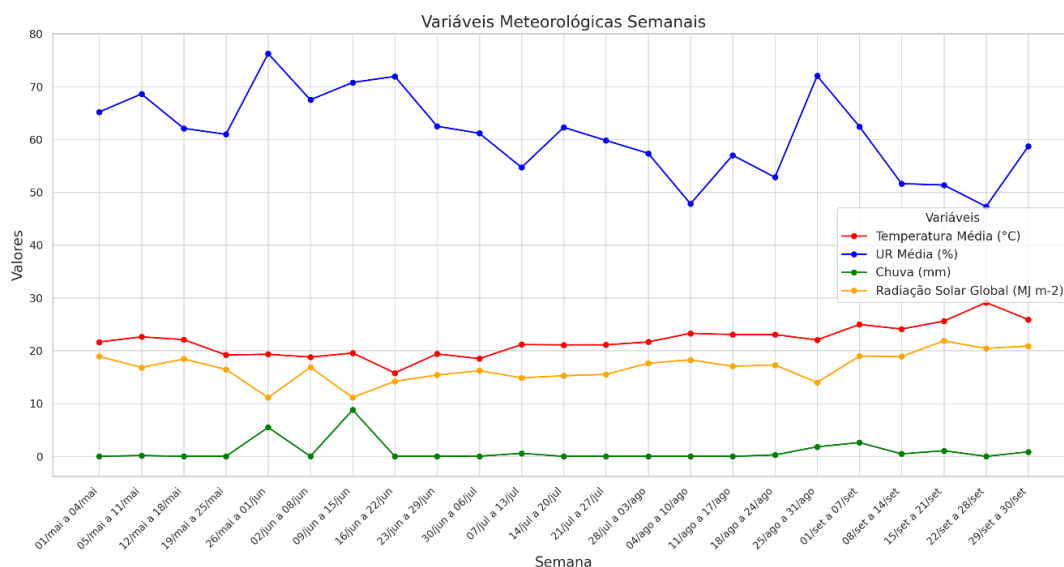


Figura 1. Médias agrometeorológicas (temperatura, umidade relativa [UR], pluviosidade [chuva] e radiação global por semana durante o período experimental.

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC) com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹) em quatro blocos em sistema de irrigação de gotejamento autocompensador, com emissores espaçados a 0,5 metros e uma vazão de 1,6 L h⁻¹. As parcelas experimentais tinham dimensões de 6 x 6 m, totalizando uma área de 36 m², sendo que a área útil para análise foi de 16 m².

O experimento foi conduzido utilizando a cultivar de milho STATUS VIP 3, com uma densidade de semeadura de 4 sementes por metro linear. A adubação dos nutrientes (N, P, K, S, Zn e B) e a calagem, seguiu, as recomendações de calagem e adubação para o estado de São Paulo, Brasil (Cantarella et al., 2021).

3.3 Manejo da irrigação

O nível de capacidade de retenção de água no solo (CRA) foi determinado utilizando técnicas de coleta de amostras indeformadas do solo. A curva de retenção de água foi construída por meio de testes em mesa de tensão e câmara de pressão de Richards (Klute, 1986). Para estabelecer as condições hídricas adequadas, foi adotado um nível de 80% da CRA. Esse valor permitiu que aproximadamente 80% dos microporos fossem preenchidos com água disponível (Boaretto *et al.*, 2014).

O volume de água a ser aplicado para manter os níveis de CRA foi determinado por meio de balanços hídricos diários, que levaram em consideração o excesso ou o déficit de água no solo em relação à capacidade de campo. A evapotranspiração da cultura (ET_c) da cultura foi calculada com base no balanço hídrico, somando-se a água de irrigação, a precipitação e o uso da água do solo ao longo do período de crescimento.

3.4 Manejo da fertirrigação com silício

Para garantir a adequada disponibilidade de Si para as plantas, foi adotada a técnica de fertirrigação, iniciando-se 20 dias após a completa emergência das plantas e estendendo-se até 30 dias após o florescimento pleno. A fonte de Si selecionada para esse estudo foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol (115,2 g L⁻¹ de Si, 60,5 g L⁻¹ de Na₂O, 100 mL L⁻¹ de sorbitol e pH = 12). Além disso, para equilibrar a quantidade de sódio (Na) presente na fonte de Si nos diferentes tratamentos, foi utilizado o cloreto de sódio (NaCl).

3.5 Avaliações experimentais

O procedimento de limpeza de todas as amostras envolveu um enxágue inicial com água deionizada, seguido de imersão em solução de detergente a 0,1% e ácido clorídrico a 0,3%, finalizando com uma lavagem em água deionizada para a remoção de resíduos. Após esse processo, o material foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar até atingir massa constante. A determinação da massa seca foi realizada por meio de uma balança semi-analítica e as seguintes avaliações foram realizadas:

3.5.1 Concentrações de C, N, P e Si

Foi realizada a coleta das folhas da planta inteira do milho em pleno florescimento da cultura. O teor de Si foi obtido pela extração alcalina (Kraska; Breitenbeck, 2010) e a leitura foi realizada por espectrofotômetro a 410 nm (Korndorfer et al., 2004). O teor foliar P foi determinado pela digestão nítrico-perclórico e as leituras pelo método colorimétrico (Bataglia et al., 1983). As concentrações de C e N na parte aérea foram determinadas por combustão à seco a 1000°C usando um analisador elementar (LECO Truspec CHNS).

3.5.2 Acúmulo de C, N, P e Si

Os acúmulos desses elementos foram estimados a partir da multiplicação das suas concentrações e massa seca das folhas da planta inteira.

3.5.3 Eficiências de uso de C, N e P

Foram calculadas de acordo com Fageria e Baligar (2005) pela razão do quadrado da massa seca das folhas da planta inteira e o acúmulo de nutrientes nas folhas.

3.5.4 Estequiometria C, N e P

A partir das concentrações dos nutrientes e do Si nas folhas da planta inteira foram estabelecidas as razões elementares de C:N, C:P, C:Si e N:P.

3.6 Análise de dados

3.6.1. Teste de outliers

Os dados foram submetidos ao teste de outliers pelo método dos quartis. Inicialmente, o conjunto de dados organizados foi utilizado para calcular os quartis. O primeiro quartil (Q1) foi o valor abaixo do qual 25% dos dados estão localizados, enquanto o terceiro quartil (Q3) representou o valor abaixo do qual 75% dos dados estão localizados. O segundo quartil (Q2) correspondeu à mediana dos dados. Nesse critério, consideramos como outliers as observações que estão abaixo de $Q1 - 1,5 * Q2$ ou acima de $Q3 + 1,5 * Q2$. Essa abordagem considerou como atípicas as observações que se encontram significativamente distantes do intervalo central, correspondendo a 1,5 vezes o Q2.

3.6.2. Tratamento de dados ausentes

Para lidar com os valores faltantes, foi utilizada a técnica de Imputação Múltipla. Esse método consistiu em três etapas principais:

a) *Imputação Inicial*: Nessa etapa, os valores faltantes foram preenchidos com estimativas iniciais com base em métodos como média, mediana ou regressão simples. Essas imputações forneceram uma base inicial para a geração das múltiplas imputações.

b) *Geração das Múltiplas Imputações*: Após a imputação inicial, múltiplas versões completas do conjunto de dados foram geradas, cada uma com valores diferentes para os dados faltantes. Essas imputações foram realizadas por meio de técnicas estatísticas avançadas, como a MICE (Multiple Imputation by Chained Equations).

c) *Análise e Combinação dos Resultados*: Em seguida, cada uma das versões completas do conjunto de dados foi analisada separadamente, gerando resultados para cada imputação. Posteriormente, os resultados das análises foram combinados, utilizando técnicas estatísticas apropriadas, para obter estimativas finais e seus respectivos intervalos de confiança.

3.6.3. Testes de Normalidade e Homogeneidade

Os dados foram submetidos aos testes de preposição de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$) (Royston, 1995) e homogeneidade de Levene ($p > 0.05$) (Gastwirth et al., 2009) com auxílio da linguagem de programação Python (versão 3.9.7; Python Software Foundation).

3.6.4. Análise de variância e teste de média

Os dados foram submetidos a análise de variância e, quando significativo, foram submetidos ao teste de média de Tukey ($p < 0.05$) com auxílio da linguagem de programação Python (versão 3.9.7; Python Software Foundation).

4. RESULTADOS

4.1 Concentrações dos nutrientes

A concentração de Si nas folhas da planta inteira respondeu de forma quadrática, ocorrendo incremento até a dose de 7,4 kg ha⁻¹ de Si, alcançando a concentração de 8,9 g kg⁻¹ de Si (Figura 2a). Enquanto para a concentração de C, foi observada resposta quadrático, que nas folhas ocorreu incremento até a dose de 5,9 kg ha⁻¹ de Si, atingindo a concentração de 405,8 g kg⁻¹ de C (Figura 2b). Para a concentração de N, não houve resposta significativa para o aumento das doses de Si (Figura 2c). Por fim, para a concentração de P nas folhas da planta inteira respondeu de forma linear em função do aumento da dose de Si (Figura 2d).

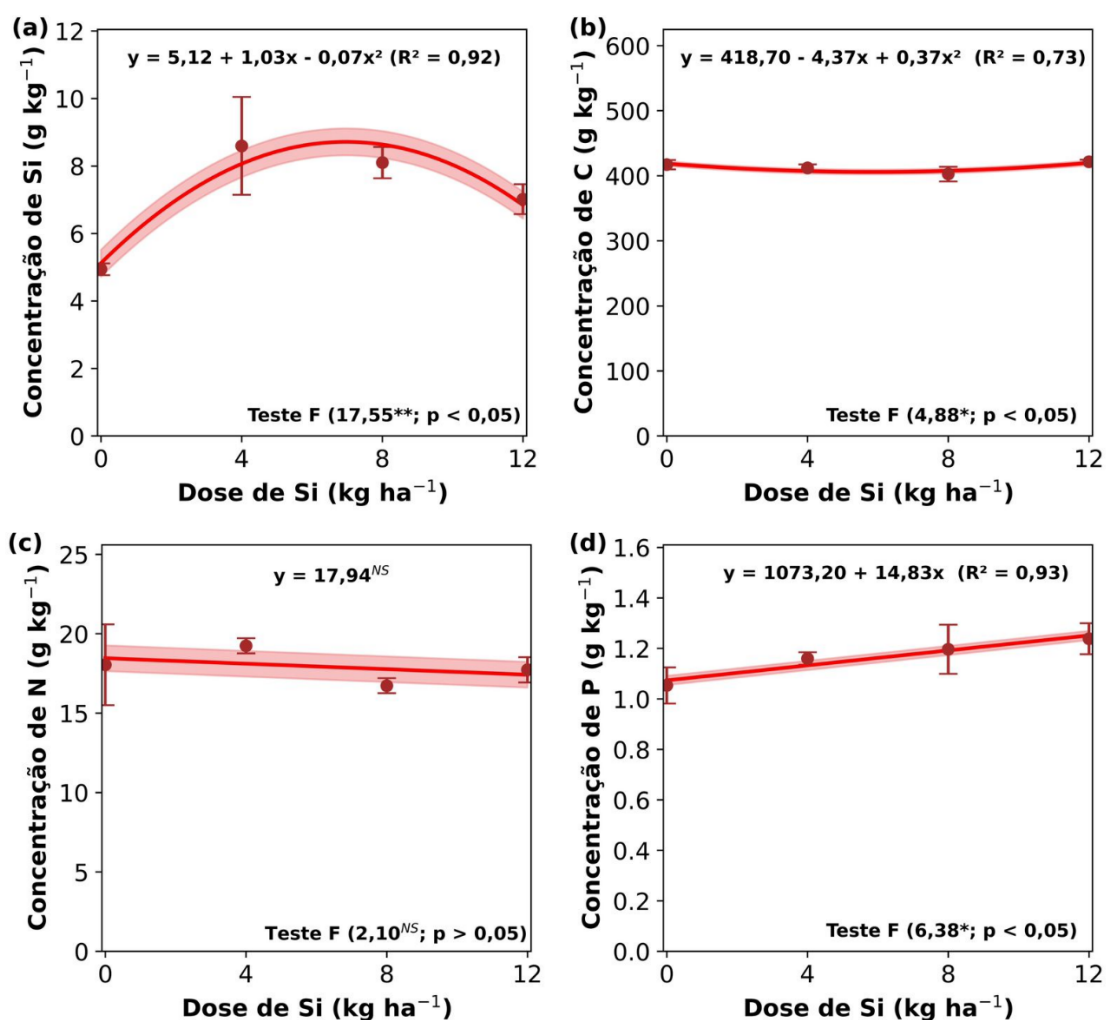


Figura 2. Concentrações de Si (a), C (b), N (c) e P (d) nas folhas da planta inteira de milho cultivadas com diferentes doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg há⁻¹). As barras de erro representam o erro padrão (n = 5).

4.2 Homeostase nutricional

Analisando a homeostase nutricional das plantas, foi possível observar que para C:N nas folhas da planta inteira, houve resposta quadrática, ocorrendo a diminuição até a dose de 5,5 kg ha⁻¹ de Si, obtendo a menor razão em 22,5 (Figura 3a). Enquanto para avaliação da homeostase de C:P, foi possível observar o comportamento responsivo à dose de Si nas folhas da planta inteira, onde houve diminuição de forma quadrática até a dose de 8,6 kg ha⁻¹ de Si, obtendo o mínimo de 325,5 (Figura 3b).

Para a relação C:Si, foi possível observar resposta de forma quadrática, ocorrendo a diminuição até a dose de 7,3 kg ha⁻¹ de Si, obtendo a mínima em 45,3 (Figura 3c). Para a relação N:P nas folhas da planta inteira, houve resposta linear negativa, diminuindo com o aumento da dose de Si (Figura 3d).

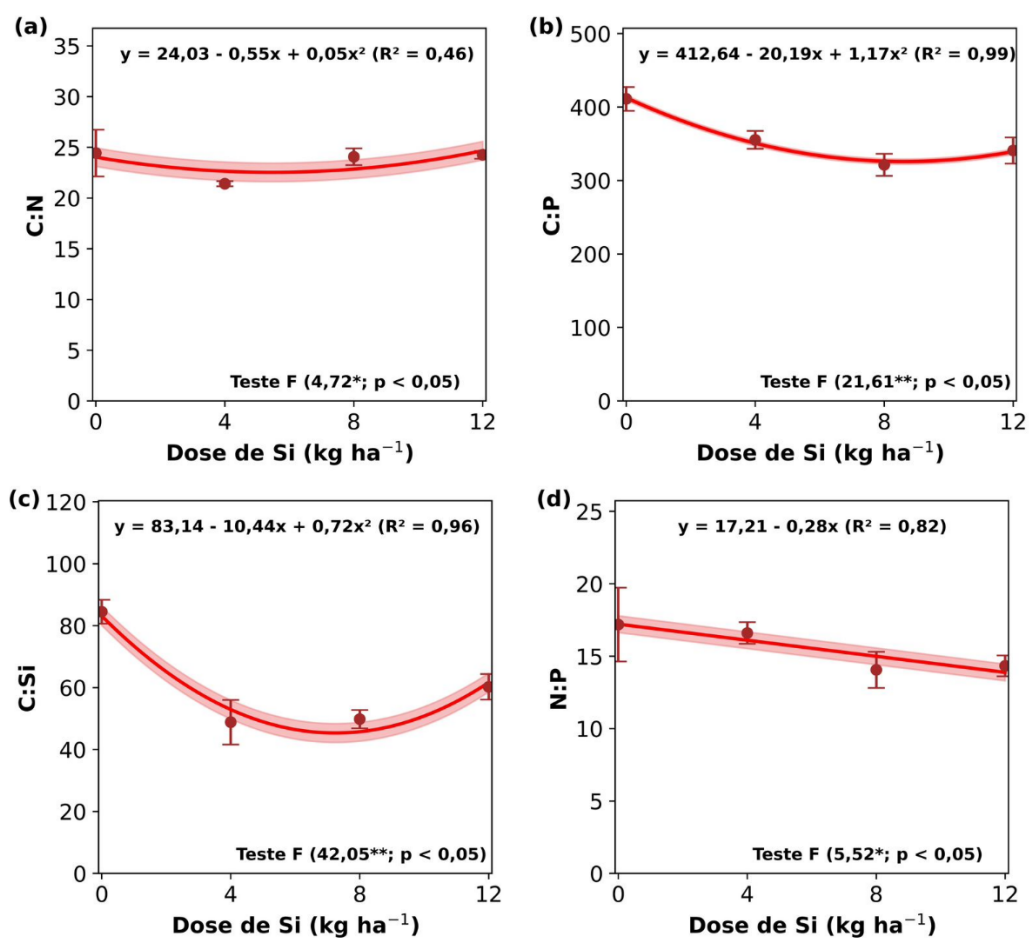


Figura 3. Homeostase C:N (a), C:P (b), C:Si (c) e N:P (d) nas folhas da planta inteira de milho cultivadas com diferentes doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹). As barras de erro representam o erro padrão (n = 5).

4.3- Acúmulo de nutrientes

O acúmulo do Si respondeu de forma quadrática nas folhas, ocorrendo incremento até a dose de 6,8 de Si, obtendo o máximo acúmulo de 293,6 mg de Si por planta (Figuras 4a).

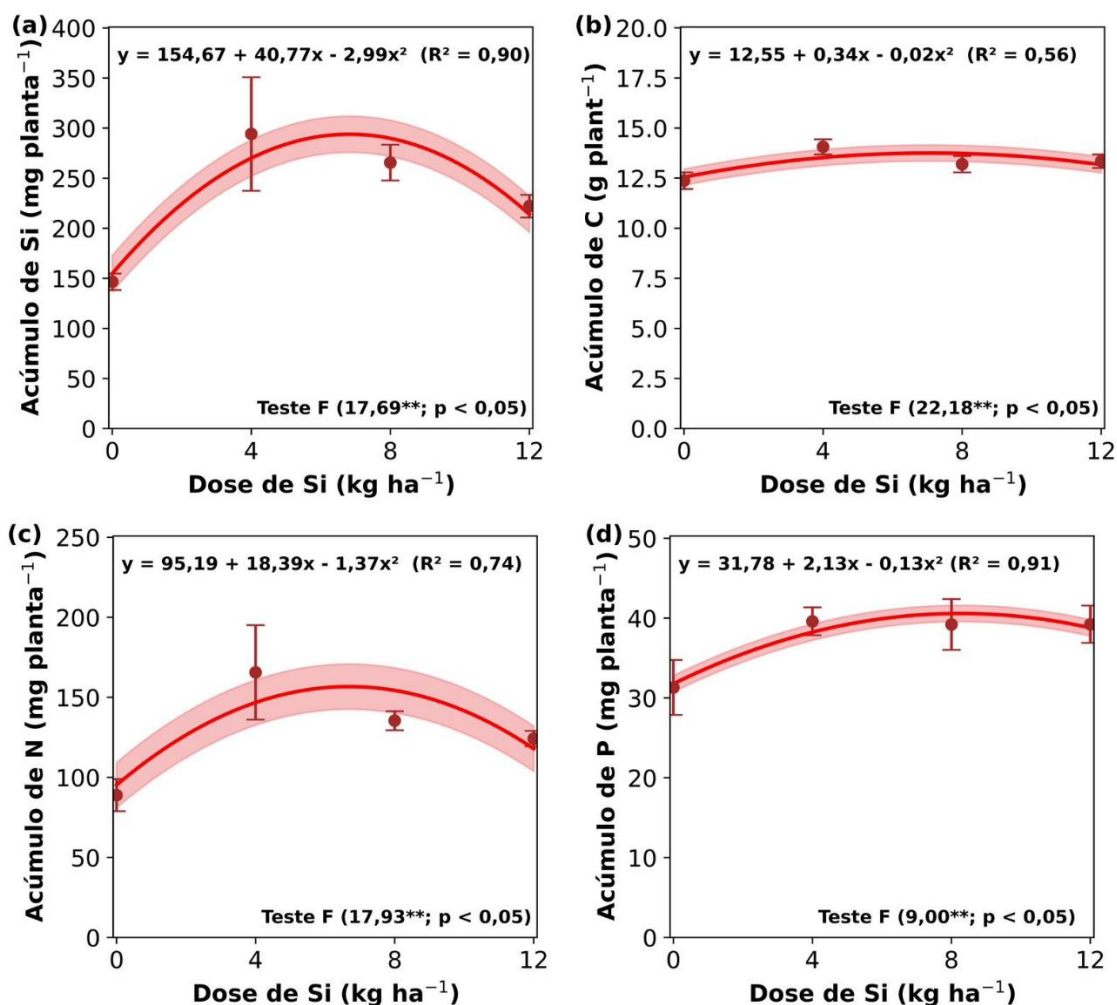


Figura 4. Acúmulos de Si (a), C (b), N (c) e P (d) nas folhas da planta inteira de milho cultivadas com diferentes doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹). As barras de erro representam o erro padrão (n = 5).

Para o acúmulo de C, também obtive resposta de forma quadrática nas folhas da planta inteira de milho, havendo o incremento até a dose de 8,5 kg ha⁻¹ de Si, obtendo o máximo acúmulo de 14 mg de C por planta (Figuras 4b).

O acúmulo de N nas folhas também respondeu de forma quadrática, ocorrendo o incremento até a dose de 6,7 kg ha⁻¹ de Si, obtendo o máximo acúmulo em 156,9 mg de N por planta nas folhas (Figura 4c).

O acúmulo de P também respondeu de forma quadrática, ocorrendo o incremento até a dose de 8,2 ha⁻¹ de Si, obtendo o máximo acúmulo de 40,5 mg de P por planta nas folhas (Figuras 4d).

4.4 - Eficiência de uso dos nutrientes

A eficiência de uso C respondeu de forma quadrática, incrementando até a dose de 6,5 kg ha⁻¹ de Si, obtendo a máxima eficiência com 83,5 g² g⁻¹ de C por planta nas folhas (Figuras 5a).

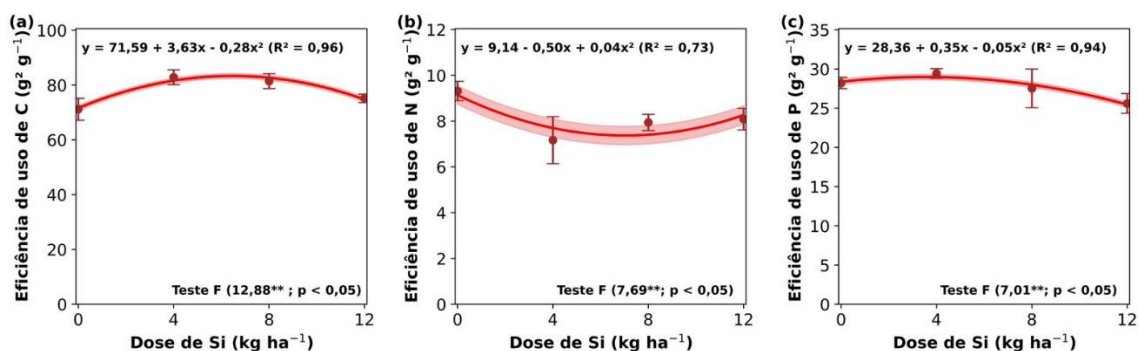


Figura 5. Eficiência de uso do C (a), do N (b) e do P (c) nas folhas da planta inteira de milho cultivadas com diferentes doses de Si (0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹). As barras de erro representam o erro padrão (n = 5).

Para a eficiência de uso de N, respondeu-se também de forma quadrática, incrementando até a dose de 6,3 kg ha⁻¹ de Si, obtendo a máxima eficiência com 7,6 g² g⁻¹ de N nas folhas (Figura 5b). Para eficiência de uso de P nas folhas da planta inteira, também observou-se resposta quadrática, ocorrendo incremento até a dose de 3,5 kg ha⁻¹ de Si, obtendo a máxima eficiência com 29 g² g⁻¹ de P (Figura 5c).

5. DISCUSSÃO

A fertirrigação com Si demonstrou ser altamente eficiente, promovendo o acúmulo de Si nas folhas da planta inteira de milho ($8,9 \text{ g kg}^{-1}$) em doses próximas a 7 kg ha^{-1} (Figura 2a). Este método, além de garantir a absorção eficiente do Si, mostrou-se particularmente útil em solos tropicais, caracterizados por baixa disponibilidade natural de Si devido à lixiviação intensa e baixos níveis de saturação de bases (Schaller et al., 2021; Costa et al., 2023a).

Os estudos de Costa et al. (2023a) and Costa et al. (2023b) confirmam que a fertirrigação com Si aumenta a eficiência de transporte e absorção, especialmente em plantas acumuladoras como milho e cana-de-açúcar. Costa et al. (2024) destacam o papel do Si na proteção contra estresses abióticos, principalmente em solos arenosos, onde a mobilidade do Si pode ser limitada. Além disso, os autores demonstraram que o acúmulo de Si nas paredes celulares confere maior rigidez estrutural às plantas, aumentando sua tolerância a estresses ambientais e bióticos, como seca e ataque de patógenos.

A respostas das plantas de milho à fertirrigação com Si também pode estar associado a presença de transportadores de Si (LSi1, LSi2, LSi3 e LSi6), presentes nas gramíneas, permitindo o aumento da eficiência da absorção do Si (Gaur et al. 2020). A presença dos transportadores de Si permite que estas plantas aumente o acúmulo de Si, como observado no presente estudo (Figuras 4a e 4b).

A redução significativa da razão C:Si em folhas (45,3) com o aumento das doses de Si (Figura 3c) reflete o papel do Si em otimizar o uso de C e reduzir a dependência de compostos ricos em C, como lignina e celulose. Costa et al. (2023a) enfatizam que essa modulação nutricional ocorre devido à menor

necessidade de C estrutural, permitindo sua redistribuição para processos metabólicos essenciais, como fotossíntese e crescimento.

Costa et al. (2024) também identificaram que o Si altera as relações C:N:P, aumentando a eficiência do uso de N e P. Em condições tropicais, onde a disponibilidade de P é frequentemente limitada, o Si facilita sua absorção ao competir com ânions fosfatos nos coloides do solo, tornando-o mais disponível para as plantas. Este efeito, também observado em cana-de-açúcar, aumenta a produtividade de biomassa e melhora o equilíbrio nutricional (Costa et al., 2023b).

Além disso, o trabalho de Carvalho et al. (2022) em sorgo demonstrou que o Si reduz as razões C:N e C:P ao otimizar o uso de nutrientes, especialmente em solos com restrições hídricas ou nutricionais. Esses efeitos são consistentes com os resultados desta pesquisa, que indicam uma menor razão C:Si em resposta ao aumento das doses de Si.

Teixeira et al. (2023) relataram que o Si promove maior eficiência de uso de C, o que contribui diretamente para o aumento de biomassa e produtividade. Estudos de Liang et al. (2015) e Teixeira et al. (2023) destacaram que a formação de fitólitos é maximizada em gramíneas acumuladoras de Si e está correlacionada positivamente com a concentração do elemento nos tecidos vegetais. Este mecanismo é essencial para capturar C de forma eficiente, especialmente em sistemas tropicais, onde a estabilidade do carbono no solo é limitada.

Adicionalmente, a formação dos fitólitos ocorre em sua grande proporção nas paredes celulares, ocupando espaços dos compostos ricos em C, como

ligninas, hemicelulose e celulose (Tombeur et al., 2024), contudo, neste trabalho, houve uma redução da concentração de C nas plantas (Figura 2b), entretanto, não levando a uma redução do acúmulo de C nas doses mais responsivas da fertilização de Si (Figura 4b). Este resultado indica que as plantas enriquecidas com Si necessitam menor quantidade de C para síntese da parede celular das plantas, levando a diminuição da razão estequiométrica C:Si (Figura 3c), consequentemente, aumentando a eficiência de uso do C (Figura 5a).

Nesse cenário, os resultados deste estudo elucidam que a fertilização de Si modifica a razão estequiométrica C:Si, aumentando a eficiência de uso de nutrientes, especificamente de C. Adicionalmente, provocando o aumento do sequestro de C nos sistemas de produção agrícola.

6. CONCLUSÃO

A fertirrigação com Si demonstrou ser altamente eficaz para otimizar o acúmulo de Si em plantas de milho, promovendo redução da razão C:Si e aumento da eficiência no uso de carbono e nutrientes. Doses próximas a 7 kg ha⁻¹ maximizaram a eficiência de uso e acúmulo de nutrientes. Esses resultados reforçam a relevância do Si como ferramenta essencial para melhorar a produtividade e a sustentabilidade em sistemas tropicais.

REFERÊNCIAS:

ADATIA, M. H.; BESFORD, R. T. The Effects of Silicon on Cucumber Plants Grown in Recirculating Nutrient Solution. *Annals of Botany*, v. 58, n. 3, p. 343–351, 1986.

AGROLINK. Demanda interna de milho aumenta: projeções indicam crescimento de 6,1% em 2024. Disponível em: <<https://www.agrolink.com.br/noticias/demanda-interna-de-milho-aumenta-->

projecoes-indicam-crescimento-de-6-1--em-2024_485414.html>. Acesso em: 21 mar. 2025. Acesso em: 9 nov. 2024.

BATAGLIA, O.C, *et al.* Métodos de análise química de plantas. Boletim Técnico do Instituto Agrônomo, Campinas, Brasil. p.1-48. 1983.

BOARETTO, A. E., *et al.* Os desafios da nutrição mineral de plantas. Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras. Tradução. Jaboticabal: FCAV/CAPEL. Acesso em: 04 dezembro. 2024. 2014.

CALDARELLI, C. E.; BACCHI, M. R. P. Fatores de influência no preço do milho no Brasil. Nova Economia, v. 22, n. 1, p. 141–164, 2012.

CANTARELLA, H., *et al.* Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo, Instituto Agrônomo de Campinas, 2021.

CARVALHO, J.S., *et al.* Silicon modifies C:N:P stoichiometry and improves the physiological efficiency and dry matter mass production of sorghum grown under nutritional sufficiency. Scientific Reports, v. 12, e-16082, 2022.

CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. Geoderma, v. 195, p. 234–242, 2013.

CHEKOLE, F. C.; *et al.* Future climate implication on maize (*Zea mays*) productivity with adaptive options at Harbu district, Ethiopia. Journal of Agriculture and Food Research, v. 11, e-100480, 2023.

CHOWDHURY, S., *et al.* Role of cultural and nutrient management practices in carbon sequestration in agricultural soil. Advances in Agronomy, v. 166, p. 131–196, 2021.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: Safra 2023/24 – Décimo segundo levantamento. Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 15 out. 2024.

COSTA, M. G. *et al.* Silicon, by promoting a homeostatic balance of C:N:P and nutrient use efficiency, attenuates K deficiency, favoring sustainable bean cultivation. BMC Plant Biology, v. 23, e-213, 2023a.

COSTA, M. G. *et al.* Silicon mitigates K deficiency in maize by modifying C, N, and P stoichiometry and nutritional efficiency. Scientific Reports, v. 13, e-16929, 2023b.

COSTA, M. G. *et al.* The effect of abiotic stresses on plant C:N:P homeostasis and their mitigation by silicon. The Crop Journal, v.12, n. 2, p. 340-353, 2024.

CROP LIFE BRASIL. Milho: a evolução de uma cultura milenar. 2020. Disponível em: <https://croplifebrasil.org/noticias/milho-a-evolucao-de-uma-cultura-milenar/#:~:text=Acredita%2Dse%20que%20o%20milho,principais%20ingredientes%20na%20dieta%20ind%C3%ADgena>. Acesso em: 9 nov. 2024.

FAGERIA, N.K, BALIGAR, V.C. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *Advances in Agronomy*, 88, 97-185. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)88004-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(05)88004-6), 2005.

FAO. World Agricultural Production Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em: 20 out. 2024.

FAQUIN, V. Nutrição Mineral de Plantas. Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Solos e Meio Ambiente) a distância. Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, MG, 2005.

GASTWIRTH, J. L.; et al. The Impact of Levene’s Test of Equality of Variances on Statistical Theory and Practice. *Statistical Science*, v. 24, n. 3, p. 343–360, 2009.

GAUR, S. et al. Fascinating impact of silicon and silicon transporters in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 202, p. 110885, 2020.

GHOURI, F. et al. Effects of Silicon and Selenium in Alleviation of Drought Stress in Rice. *Silicon*, v. 14, n. 10, p. 5453–5461, 2021.

GUERRIERO, G., et al. Plant cell wall polysaccharides as an essential reservoir for the growth of silicate phytoliths in soil. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, p. 1-12, 2019.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribuição do Grupo de Trabalho II ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 9 nov. 2024.

JONES, P.; THORNTON, P. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*, v. 13, n. 1, p. 51–59, 2003.

KATZ, O. et al. Silicon in the Soil–Plant Continuum: Intricate Feedback Mechanisms within Ecosystems. *Plants*, v. 10, n. 4, p. 652, 2021.

KHANNA, M. et al. An economic perspective of the circular bioeconomy in the food and agricultural sector. *Communications Earth & Environment*, v. 5, n. 1, 2024.

Klute, A. Water Retention: Laboratory Methods. In: Klute, A., Ed., *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Edition, Agronomy Series No. 9, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, 635-662, 1986.

KORNDORFER, G. H., Pereira, H. S., & Nolla, A. *Análise de silício: solo, planta e fertilizante*. Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

KORNDÖRFER, G.; SOUZA, S. R. Elementos benéficos. *Nutrição Mineral de Plantas*, cap. 15, p. 563-599, 2018.

KRASKA, J. E.; BREITENBECK, G. A. Simple, Robust Method for Quantifying Silicon in Plant Tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 41, n. 17, p. 2075–2085, 2010.

LANNA, A. C. et al. *Importância do silício para a sustentabilidade da produção de arroz de terras altas no Cerrado brasileiro*. Brasília: Embrapa, 2021.

LIANG, Y. et al. Role of silicon in enhancing resistance to stress and promoting growth and development in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 6, p. 784, 2015.

LIANG, Y., *et al.* Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. *Chemosphere*, v. 62, n. 4, p. 578-583, 2006.

LIU, L. et al. Enhancement of phytolith-occluded carbon accumulation of Moso bamboo response to temperatures elevation and different fertilization. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, 2023.

LIU, X., *et al.* Silicon regulates nitrogen assimilation and enhances stress tolerance in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, p. 1007, 2020.

LOBELL, D. B.; FIELD, C. B. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, v. 2, n. 1, p. 014002, 2007.

MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 50, n. 1, p. 11–18, 2004.

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.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. *Silicon in Agriculture*, p. 17–39, 2001.

- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.
- MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. *Fisiologia da produção de milho*. Embrapa, 2006.
- MANDLIK, S., *et al.* The role of silicon in plant growth and development. *Plant Science Reviews*, v. 8, n. 1, p. 38-46, 2020.
- MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v. 29, p. 71-83, 1983.
- MOHANTY, S. *et al.* Silicon enhances yield and nitrogen use efficiency of tropical low land rice. *Agronomy Journal*, v. 112, n. 2, p. 758–771, 2020.
- NEVES, M. F. *et al.* *Etanol de Milho*. Marketstrat, Ribeirão Preto, 2021.
- PITTELKOW, C. M. *et al.* Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, v. 517, n. 7534, p. 365–368, 2015.
- QUIGLEY, K. M.; ANDERSON, T. M. Leaf silica concentration in Serengeti grasses increases with watering but not clipping: insights from a common garden study and literature review. *Frontiers in Plant Science*, v. 5, 2014.
- ROYSTON, J.P. Remark AS R94: A Remark on Algorithm AS 181: The W Test for Normality. *Applied Statistics*, 44, 547-551, 1995.
- SANTOS, L. C. DOS *et al.* O papel do silício nas plantas. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 7, e-3810716247, 2021.
- SCHALLER, J.; *et al.* Silicon Cycling in Soils Revisited. *Plants*. v. 10. n. 295, 2021.
- SILVA, N. P. Desempenho agronômico e fisiológico de híbridos de milho cultivados com e sem restrição hídrica Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido. V.1, p. 1-83, 2019.
- SINGH, V., *et al.* Silicon mediated regulation of phosphorus metabolism and transport in plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 220-233, 2023.
- SLUYTER, A.; DOMINGUEZ, G. Early maize (*Zea mays* L.) cultivation in Mexico: Dating sedimentary pollen records and its implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, n. 4, p. 1147–1151, 2006.
- SOUSA JUNIOR, G. DA S. *et al.* Nutritional and structural role of silicon in attenuating aluminum toxicity in sugarcane plants. *Silicon*, v. 14, n. 9, p. 5041–5055, 4 ago. 2021.

TEIXEIRA, K. S., et al. Silicon fertilization enhances growth and nutrient efficiency in sugarcane. *Frontiers in Plant Science*, v.14, n.11, p.49-61, 2023.

TOMBEUR, F. et al. How important is carbon sequestration in phytoliths within the soil? *Plant and Soil*, v. 505, n. 1-2, p. 185–198, 2024.

XU, R. et al. Functions of silicon and phytolith in higher plants. *Plant Signaling & Behavior*, v. 18, n. 1, e- 2198848, 2023.