

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

**EFEITOS DO SILÍCIO SOB OS DANOS CELULARES E TEORES DE
CLOROFILAS EM PIMENTÃO COM BAIXO SUPRIMENTO DE POTÁSSIO**

ANA LUISA RIBEIRO RESENDE

**JABOTICABAL – SP
2025**

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

**EFEITOS DO SILÍCIO SOB OS DANOS CELULARES E TEORES DE
CLOROFILAS EM PIMENTÃO COM BAIXO SUPRIMENTO DE POTÁSSIO**

ANA LUISA RIBEIRO RESENDE

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorientadora: M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves

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

Jaboticabal – SP
2º semestre/2025

R433e Resende, Ana Luisa Ribeiro

Efeitos do silício sob os danos celulares e teores de clorofilas em pimentão com baixo suprimento de potássio / Ana Luisa Ribeiro Resende. -- Jaboticabal, 2025

43 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

Coorientadora: Deyvielen Maria Ramos Alves

1. Hortaliças. 2. Fertilizantes potássicos. 3. Nutrição das plantas. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



ANA LUISA RIBEIRO RESENDE

**EFEITOS DO SILÍCIO SOB OS DANOS CELULARES E TEORES DE
CLOROFILAS EM PIMENTÃO COM BAIXO SUPRIMENTO DE POTÁSSIO**

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

Coorientadora: M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves

Área de Concentração: Nutrição de Plantas

Data da defesa: 18/09/2025

☒ Aprovado
() Reprovado

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Renato de Mello Prado

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Dr. Antonio Márcio Souza Rocha

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

M.Sc. Milton Garcia Costa

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

19 / 09 / 2025

Aprovado Ad Referendum do
Conselho do Departamento

Prof. Dr. José Eduardo Corá
Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha família,
por todo apoio, motivação e suporte
ao longo da minha trajetória.*

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho somente foi possível graças ao apoio, incentivo e colaboração de muitas pessoas que contribuíram de diferentes formas para esta conquista.

Agradeço primeiramente à Deus, por me guiar, fortalecer e iluminar meu caminho durante esta jornada. Agradeço também a minha família pelo apoio e incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado e à minha coorientadora M.Sc. Deyvielen Maria Ramos Alves, agradeço pela oportunidade de realização deste trabalho, e por me orientarem durante este período.

Por fim, gostaria de agradecer à FCAV, pela estrutura e recursos oferecidos. Agradeço também aos meus professores, pelo conhecimento transmitido e pelos ensinamentos que levarei para além da vida acadêmica.

ÍNDICE

RESUMO	ix
SUMMARY	x
1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. O pimentão	13
2.1.1. Caracterização botânica, origem, variedades e importância econômica do pimentão	13
2.1.2. Valor nutricional, minerais e propriedades bioativas do pimentão	15
2.1.3. Aspectos agronômicos, manejo e cultivo hidropônico do pimentão	16
2.2. Potássio no desenvolvimento vegetal: funções e danos da deficiência em pimentão	18
2.3. Silício na atenuação da deficiência de potássio	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Avaliações fisiológicas	25
3.1.1. Teores de clorofilas	25
3.1.2. Índice de extravasamento de eletrólitos	26
3.1.3. Eficiência da conversão de energia absorvida	26
3.2. Avaliação bioquímica	27
3.2.1. Compostos fenólicos	27
3.3. Avaliações biométricas	27
3.4. Avaliações de biomassa	27
3.5. Determinação dos teores do potássio e do silício	27
3.6. Análise dos resultados	28
4. RESULTADOS	28
5. DISCUSSÃO	32
6. CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	37

FIGURAS

- Figura 1.** Valores máximos (max) e mínimos (min) diários de temperatura do ar e de umidade relativa do ar monitorados durante o período experimental 24
- Figura 2.** Teor do K nas folhas (A), teor do K nas raízes (B), teor do Si nas folhas (C) e teor do Si nas raízes (D) do pimentão com deficiência de potássio (K) com presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do K dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) e as minúsculas indicam diferenças entre a presença ou ausência do Si no mesmo nível do K ($p < 0,05$) 29
- Figura 3.** Índice de extravasamento de eletrólitos (IEE, A), clorofila total (Chl a+b, B), compostos fenólicos (C) eficiência da conversão de energia absorvida (Fv/F0, D) do pimentão com deficiência de potássio (K) com presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do K dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) e as minúsculas indicam diferenças entre a presença ou ausência do Si no mesmo nível do K ($p < 0,05$) 30
- Figura 4.** Número de folhas (A), altura da planta (B), diâmetro do caule (C), massa seca da parte aérea (D), massa seca da raiz (E) do pimentão com deficiência de potássio (K) com presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do K dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) e as minúsculas indicam diferenças entre a presença ou ausência do Si no mesmo nível do K ($p < 0,05$) 32

TABELAS

Tabela 1. Composição química da solução nutritiva, com as respectivas quantidades dos nutrientes e descrição dos tratamentos aplicados durante o experimento	25
---	----

EFEITOS DO SILÍCIO SOB OS DANOS CELULARES E TEORES DE CLOROFILAS EM PIMENTÃO COM BAIXO SUPRIMENTO DE POTÁSSIO

RESUMO

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) é uma hortaliça rica em substâncias antioxidantes que podem melhorar a saúde humana, mas a deficiência de potássio (K) interfere no metabolismo da planta e influencia nos parâmetros de qualidade. Além disso, existem desafios acerca da disponibilidade dos fertilizantes potássicos, por ser um recurso natural não renovável. Por outro lado, o silício (Si) é um elemento benéfico para as plantas, especialmente em situações de estresses, a exemplo de deficiência nutricional, e pode ser uma alternativa para atenuar a deficiência de K na hortaliça. Dessa forma, o trabalho avaliou as seguintes hipóteses: i) a aplicação do Si em plantas de pimentão com deficiência de K proporcionará uma melhora nos teores de clorofilas a e b e ii) a aplicação do Si atenua os danos no metabolismo das plantas de pimentão cultivadas sob deficiência de K, devido a uma melhora na manutenção da integridade celular ao aumentar os compostos antioxidantes, que resultará em incremento de biomassa. Objetivou-se, investigar os efeitos da aplicação do Si no metabolismo das plantas de pimentão cultivadas sob condições de deficiência de K, principalmente nos teores de clorofilas, na síntese de compostos antioxidantes, na estabilidade das membranas celulares e no acúmulo de biomassa. O experimento foi realizado em casa de vegetação no Departamento de Ciência do Solo, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, no município de Jaboticabal, São Paulo, Brasil. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com esquema fatorial 2x2, tendo as condições do K adequado ($3,6 \text{ mmol L}^{-1}$) e deficiente ($0,0 \text{ mmol L}^{-1}$), combinadas com a ausência ou presença do Si ($2,0 \text{ mmol L}^{-1}$), utilizando nanossílica Bindizil®, sendo quatro tratamentos de quatro repetições. Foram analisados os teores do K e do Si nas folhas e nas raízes, índice de extravasamento de eletrólitos (IEE), teor de clorofila total (Chl total), compostos fenólicos, eficiência da conversão de energia absorvida (F_v/F_0), número de folhas, altura da planta, diâmetro do caule, massa seca da parte aérea e massa seca da raiz. A aplicação do Si em plantas sob deficiência de K favoreceu os teores do Si nas folhas e raízes, teor de Chl total, compostos fenólicos, relação F_v/F_0 , diâmetro do caule, massa seca da parte aérea e da raiz. Além disso, reduziu o IEE nas plantas. Em plantas sob suficiência de K, o fornecimento de Si possibilitou incrementar o teor do K nas folhas, teores do Si nas folhas e raízes, teor de Chl total, compostos fenólicos, relação F_v/F_0 , número de folhas, diâmetro do caule e massa seca da parte aérea. Portanto, concluiu-se que o Si favoreceu aspectos fisiológicos, potencializando o crescimento das plantas de pimentão na deficiência e na suficiência de potássio na solução nutritiva.

Palavras-chave: *Capsicum annuum* L.; Fertilizantes potássicos; Deficiência nutricional; Nanossílica; Solução nutritiva.

EFFECTS OF SILICON ON CELL DAMAGE AND CHLOROPHYLL CONTENT IN BELL PEPPER WITH LOW POTASSIUM SUPPLY

SUMMARY

Bell pepper (*Capsicum annuum* L.) is a vegetable rich in antioxidants that can improve human health. However, potassium (K) deficiency interferes with plant metabolism and influences quality parameters. Furthermore, there are challenges regarding the availability of potassium fertilizers, as it is a non-renewable natural resource. On the other hand, silicon (Si) is a beneficial element for plants, especially in stressful situations, such as nutritional deficiencies, and may be an alternative to mitigate K deficiency in vegetables. Therefore, the study evaluated the following hypotheses: i) applying Si to bell pepper plants with K deficiency will improve chlorophyll a and b levels and ii) applying Si mitigates metabolic damage in bell pepper plants grown under K deficiency, due to improved cellular integrity maintenance by increasing antioxidant compounds, which will result in increased biomass. The objective of this study was to investigate the effects of Si application on the metabolism of bell pepper plants grown under K deficiency conditions, mainly on chlorophyll content, antioxidant synthesis, cell membrane stability, and biomass accumulation. The experiment was carried out in a greenhouse at the Department of Soil Science, Faculty of Agricultural and Veterinary Sciences, São Paulo State University, in the municipality of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. A completely randomized experimental design was used, with a 2x2 factorial scheme, with adequate (3.6 mmol L^{-1}) and deficient (0.0 mmol L^{-1}) K conditions, combined with the absence or presence of Si (2.0 mmol L^{-1}), using Bindizil® nanosilica, with four treatments and four replicates. The K and Si contents in leaves and roots, electrolyte leakage index (EEI), total chlorophyll content (total Chl), phenolic compounds, absorbed energy conversion efficiency (Fv/F0), number of leaves, plant height, stem diameter, shoot dry mass and root dry mass were analyzed. Si application to plants under K deficiency favored Si contents in leaves and roots, total Chl content, phenolic compounds, Fv/F0 ratio, stem diameter, shoot dry mass and root dry mass. Furthermore, it reduced the EEI in plants. In plants under K sufficiency, Si supply increased K contents in leaves, Si contents in leaves and roots, total Chl content, phenolic compounds, Fv/F0 ratio, number of leaves, stem diameter and shoot dry mass. Therefore, it was concluded that Si favored physiological aspects, enhancing the growth of bell pepper plants in potassium deficiency and sufficiency in the nutrient solution.

Keywords: *Capsicum annuum* L.; Potassium fertilizers; Nutritional deficiency; Nanosilica; Nutrient solution.

1. INTRODUÇÃO

As hortaliças do gênero *Capsicum* que pertencem à família Solanaceae, apresentam cinco espécies domesticadas, sendo a *Capsicum annuum* L., a espécie mais popular e com maior relevância econômica (Madhavi et al., 2016). A espécie é típica de regiões tropicais e apresenta dois tipos distintos: i) doces, como o pimentão e ii) picantes (Massimi e Radocz, 2021).

O pimentão tem se destacado como uma importante fonte de provitamina A e compostos fenólicos (Ghasemnezhad; Sherafati; Payvast, 2011). Essas substâncias são antioxidantes que neutralizam os efeitos provocados pelas espécies reativas de oxigênio (ERO) no organismo, reduzindo o estresse oxidativo, por isso, a ingestão dessa hortaliça é considerada um fator importante para a melhoria da saúde humana, prevenindo o aparecimento de doenças (Chávez-Mendoza et al., 2015).

Por outro lado, para que os frutos tenham boa qualidade, o potássio (K) é considerado o nutriente mais relevante nesse aspecto, atuando em processos fundamentais na planta (Botella et al., 2017), como: i) regulação estomática, ii) transporte de água e nutrientes, iii) expansão celular, iv) otimização da taxa fotossintética, v) elevação do potencial osmótico, gerando maior teor de água na célula (Prado, 2021).

No entanto, existem desafios relacionados com a disponibilidade e o fornecimento de fertilizantes potássicos, principalmente em países em desenvolvimento, devido ao fato de as fontes do nutriente estarem distribuídas geograficamente de forma limitada (Manning, 2010) e por ser um recurso natural não renovável (Rajaraman, 1976).

Entretanto, a deficiência de K nas plantas prejudica o processo da fotossíntese, pois interfere na abertura e fechamento dos estômatos e na atividade da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxigenase (RubisCO), fazendo com que tenha uma limitação na fixação de dióxido de carbono (CO₂), levando à produção excessiva de ERO, comprometendo a integridade da membrana celular e gerando a degradação da clorofila (Cakmak, 2005).

As plantas podem ativar mecanismos para controlar a deficiência de K, permitindo uma absorção de alta afinidade, por meio de estruturas que indicam teores reduzidos do K na planta, como espécies de oxigênio ativo e fitohormônios (Prado, 2021). Contudo, a adubação silicatada se apresenta como uma alternativa para minimizar a deficiência de K nos sistemas de cultivo (Caione, 2023).

O silício (Si) é descrito como um elemento benéfico (Prado, 2021), que apresenta diversos efeitos positivos sobre as plantas, especialmente em condições de estresse (Ma; Miyake; Takahashi, 2001). A exemplo disso, o Si atua na redução do índice de extravasamento de eletrólitos, devido à manutenção da estabilidade das membranas celulares (Agarie et al., 1998). Assim como, apresenta a capacidade de otimizar os sistemas antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos, os quais cooperam no alívio do estresse oxidativo nas plantas (Mostofa et al., 2021).

Além disso, o Si também pode contribuir na melhoria de parâmetros do sistema antioxidante não enzimático, aumentando a produção de compostos fenólicos, que neutralizam os efeitos dos radicais livres, observados, neste caso, pela redução do índice de extravasamento de eletrólitos, diminuindo também a degradação dos pigmentos fotossintetizantes (Alves et al., 2024a). Nessa

mesma pesquisa, os autores também mencionam que o Si aumentou o crescimento da planta e a produção de massa seca, em relação às plantas com deficiência de K que não receberam o elemento.

Dessa forma, é notório que a deficiência de K interfere no metabolismo das plantas (Caione, 2023). Ademais, o alto preço dos fertilizantes potássicos, relacionados com a oferta e distribuição dos mesmos, pode gerar baixa disponibilidade de K no futuro (Manning, 2010). Entretanto, a adubação silicatada se apresenta como uma estratégia para atenuar a deficiência de K nas culturas (Caione, 2023). Os estudos sobre o uso do Si na deficiência e na suficiência de K no pimentão ainda são incipientes.

Portanto, como hipóteses norteadoras neste estudo, consideram-se: i) a aplicação do Si em plantas de pimentão com deficiência de K proporcionará uma melhora nos teores de clorofilas a e b e ii) a aplicação do Si atenua os danos no metabolismo das plantas de pimentão cultivadas sob deficiência de K, devido a uma melhora na manutenção da integridade celular ao aumentar os compostos antioxidantes, que resultará em incremento de biomassa. Objetivou-se, investigar os efeitos da aplicação do Si no metabolismo das plantas de pimentão cultivadas sob condições de deficiência de K.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O pimentão

2.1.1. Caracterização botânica, origem, variedades e importância econômica do pimentão

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) é considerado uma das culturas mais antigas das Américas, pois desde o início da civilização, no Hemisfério Ocidental,

a cultura já era conhecida e cultivada pelos nativos, além de ser consumida na alimentação humana desde meados de 7.500 antes de Cristo (a.C) (El-Ghorab et al., 2013).

O gênero *Capsicum* pertence à família Solanaceae e apresenta cinco espécies domesticadas, sendo estas: i) *Capsicum annuum* L., ii) *Capsicum chinense*, iii) *Capsicum pubescens*, iv) *Capsicum frutescens* e v) *Capsicum baccatum* (Liu; Kang; Kang, 2013). A origem das espécies do gênero *Capsicum* está relacionada com as regiões tropicais das Américas, havendo no México, uma ampla gama de variedade genética de *Capsicum annuum* L. (Crosby, 2008).

As pimentas são classificadas de acordo com o grau de pungência, podendo ser picantes, suaves ou doces, e os pimentões, que se enquadram no grupo das pimentas doces, podem apresentar cores diferentes, como: i) verde, ii) vermelho, iii) laranja e iv) amarelo (Anaya-Esparza et al., 2021).

A planta do pimentão é cultivada como anual, sendo um subarbusto com altura que varia de 25 centímetros (cm) a 1 metro (m), constituindo-se de folhas simples, ovaladas e lanceoladas (Govindarajan e Salzer, 1985). As espécies do gênero *Capsicum* possuem flores completas, compostas por cinco sépalas, pétalas, pistilos e estames (Liu; Kang; Kang, 2013). Além disso, os frutos do pimentão apresentam uma aparência em blocos (lóbulos) e geralmente são grandes, possuindo cerca de 7,5 cm de largura e 10 cm de comprimento (Govindarajan e Salzer, 1985).

Nos estádios iniciais de cultivo, as temperaturas baixas interferem negativamente no metabolismo do pimentão, por isso é considerada uma planta que apresenta desenvolvimento e produção em temperaturas mais elevadas (Trecha; Lovatto; Mauch, 2017), sendo a faixa adequada de temperatura entre

16°C a 30°C (Silva; Escobedo; Galvani, 2002). Nas espécies cultivadas de *Capsicum*, predomina-se a autopolinização, mas também podem ser polinizadas por insetos (Liu; Kang; Kang, 2013). Entre as cultivares populares de tipos doces ou suaves, pode-se citar: i) ruby king e ii) california wonder (Govindarajan e Salzer, 1985).

No Brasil, o pimentão apresenta popularidade no mercado de hortaliças, pois está classificado entre as dez mais importantes olerícolas cultivadas, com uma produtividade média variando de 10 a 45 toneladas por hectare, de acordo com alguns fatores, como: i) cultivar, ii) região, iii) época de produção e iv) tecnologia utilizada na área (Trecha; Lovatto; Mauch, 2017). Em 2018, o Brasil produzia cerca de 250 milhões de quilos (kg) de pimentão por ano (Lopes et al., 2018).

2.1.2. Valor nutricional, minerais e propriedades bioativas do pimentão

O pimentão apresenta nível elevado de água e fibras, além de baixos teores de proteínas, lipídios e calorias, por isso, é considerado uma olerícola importante para a saúde dos consumidores (Anaya-Esparza et al., 2021). Segundo Nascimento et al. (2019), a constituição do pimentão verde é caracterizada por 93,55% de umidade, 1,68% de proteína, 0,50% de lipídios e 3,78% de carboidratos.

Ademais, os frutos são compostos por minerais essenciais para os seres humanos, com teores ótimos de ferro, magnésio, manganês, fósforo, cobre e K, sendo também, uma boa fonte de vitaminas, sendo estas: i) vitamina B2, ii) vitamina B3, iii) vitamina K, iv) vitamina C e compostos pró-vitamínicos, a exemplo da provitamina A (Liu; Kang; Kang, 2013).

Os pimentões apresentam grande destaque entre as olerícolas, devido à ampla quantidade de antioxidantes na sua composição (Chávez-Mendoza et al., 2015). Os antioxidantes naturais de origem vegetal são classificados como vitaminas e compostos fenólicos, atuando de forma preventiva contra as doenças em seres humanos (El-Ghorab et al., 2013). Essas substâncias possibilitam a proteção dos lipídeos ao bloquear a oxidação causada pelos radicais livres (Nadeem et al., 2011). Entre os compostos fenólicos encontrados em maior quantidade no pimentão verde, destacam-se: i) miricetina (658 µg/g) e ii) pirogalol (572 µg/g) (Anaya-Esparza et al., 2021).

Portanto, a ingestão dessa olerícola é importante para a melhora da saúde humana, auxiliando na prevenção do surgimento de doenças, devido à sua rica composição (Emmanuel-Ikpeme; Henry; Okiri, 2014). A exemplo disso, têm-se que a extração de compostos bioativos do pimentão apresentou ação anti-inflamatória e indicou eficiência na redução do risco do desenvolvimento de doenças, como diabetes e câncer (Anaya-Esparza et al., 2021).

2.1.3. Aspectos agronômicos, manejo e cultivo hidropônico do pimentão

O cultivo protegido proporciona a oferta de hortaliças durante o ano todo, garantindo produtos de melhor qualidade, possibilitando também, maiores produtividades e rentabilidade para o produtor (Scivittaro et al., 1999). Esse tipo de cultivo reduz o efeito direto de fatores ambientais, possibilitando também o uso econômico da água e dos nutrientes (Alberoni, 1997). Diante desse cenário, os pimentões são considerados uma ótima escolha para serem implantados em ambiente protegido, principalmente por apresentarem alta cotação no mercado, garantindo retorno financeiro (Scivittaro et al., 1999).

O cultivo do pimentão em ambiente protegido é predominante na região sudeste e sul do Brasil, devido aos riscos climáticos, como baixas temperaturas e geadas que podem ocorrer nessas áreas, porém em locais com altas temperaturas, a produção pode ser realizada em campo aberto (Trecha; Lovatto; Mauch, 2017).

No cultivo hidropônico, diferente do cultivo com solo, a necessidade das culturas é apresentada de forma mais generalizada, adotando-se a aplicação da solução nutritiva indicada por Hoagland e Arnon (1950). No entanto, existem outras adaptações das concentrações dos nutrientes, a partir dessa solução, ou até mesmo algumas indicações para algumas espécies (Zhang et al., 2019), como para o pimentão (Oliveira et al., 2022). Entretanto, os estudos nessa área ainda são incipientes.

A solução nutritiva deve ser fornecida às plantas de forma equilibrada, contendo os nutrientes e o potencial hidrogeniônico (pH) ideal, evitando a utilização de águas salinas e optando por águas isentas de patógenos (Bezerra Neto e Barreto, 2012). Logo, o fornecimento dos nutrientes deve ser realizado de maneira correta, ou seja, utilizando quantidades necessárias, métodos adequados e momento ideal de acordo com a necessidade da planta (El-Bassiony et al., 2010).

Em relação ao substrato, geralmente é utilizado o inerte ou de baixa atividade química, mas a função principal do substrato é de proporcionar a sustentação das plantas, a exemplo da areia lavada que é considerada de baixo custo e proporciona facilidade para a remoção das raízes, apesar do não reaproveitamento da solução nutritiva (Bezerra Neto e Barreto, 2012).

É possível citar diversos benefícios acerca do cultivo hidropônico, sendo estes: i) produção em áreas menores, ii) uso econômico de água e nutrientes, iii) rápido retorno do capital, iv) trabalhos menos intensos com menor número de operações necessárias, v) produção fora de época, vi) redução de efeitos de adversidades climáticas se a produção for realizada em casa de vegetação ou em ambiente controlado (Alberoni, 1997). Além disso, nesse tipo sistema de produção, cultiva-se desde flores ornamentais, frutas a hortaliças (Dholwani et al., 2018).

A hidroponia tem se consolidado como uma alternativa viável em regiões onde a produção no campo apresenta custos elevados ou em propriedades rurais afetadas pela expansão urbana e que passaram a cultivar em áreas menos propícias (Bezerra Neto e Barreto, 2012). Portanto, esse tipo de cultivo está em constante crescimento na agricultura, devido às vantagens proporcionadas e às altas chances de obter domínio sobre o mercado de alimentos no futuro (Dholwani et al., 2018).

2.2. Potássio no desenvolvimento vegetal: funções e danos da deficiência em pimentão

O K é o sétimo elemento encontrado em maior quantidade na crosta terrestre, essencial para as plantas, animais e humanos (Sharma; Shankhdhar; Shankhdhar, 2016). Nos vegetais, é considerado o cátion inorgânico mais abundante (Amtmann e Rubio, 2012). Além disso, o K é um nutriente móvel nas plantas, sendo encontrado em alta concentração na seiva da célula vegetal (100-200 milimolar) (Dotaniya et al., 2016). Esse macronutriente interfere no crescimento, desenvolvimento e qualidade das plantas (Prado, 2021).

A absorção pelas raízes e translocação do K no interior da planta ocorre na forma catiônica (Meena et al., 2016). O nutriente é absorvido pelas raízes através do plasmalema ou membrana celular (Dotaniya et al., 2016). O processo de absorção pode ser interferido pela umidade, teores de K no meio e idade da planta (Prado, 2021).

Por outro lado, a produção industrial de fertilizantes potássicos sintéticos é realizada a partir de minerais, nos quais o K é encontrado na forma de óxido de K (K_2O) (Meena et al., 2016). Entretanto, na agricultura, a aplicação de fertilizantes potássicos pode ser realizada com diferentes fontes, desde o cloreto de K, sulfato de K, nitrato de K, fontes orgânicas de K, que podem ser os resíduos de biogás, esterco animal e chorume (Zörb; Senbayram; Peiter, 2014).

Segundo Prakash e Verma (2016), há uma tendência de aumento na demanda por fertilizantes potássicos, porém as reservas e a produção se concentram em poucos países, além dos recursos disponíveis estarem muito limitados. Nos países em desenvolvimento, os quais dependem exclusivamente da importação desses fertilizantes, onde a produção interna não consegue atender às exigências de consumo, há uma certa preocupação acerca da disponibilidade deles (Basak et al., 2022).

Entre as funções desempenhadas por esse nutriente na planta, pode-se citar: i) regulação osmótica, mantendo a turgidez das células, ii) controle da abertura e fechamento dos estômatos, evitando perdas de água pela transpiração, iii) atuação na fotossíntese, iv) expansão celular e v) ativação enzimática (Prado, 2021).

Em plantas com deficiência de K, é comum que os frutos apresentem coloração desuniforme e teor reduzido de açúcares que comprometem sua

qualidade (Prajapati e Modi, 2012). Os sintomas visuais da deficiência de K podem ser percebidos por meio da redução na taxa de crescimento das plantas, amarelecimento das margens foliares, necrose das bordas (Prado, 2021) e enrolamento das folhas (Massimi e Radocz, 2021).

Por outro lado, na deficiência de K, os caules das plantas também se desenvolvem de forma mais fraca, principalmente porque as paredes das células ficam mais finas e os tecidos internos como o parênquima podem colapsar (Prado, 2021). Além disso, em plantas sob deficiência de K há uma diminuição do crescimento da raiz, devido à redução no transporte de açúcares para a mesma (Prado, 2021).

A deficiência de K pode também interferir na fotossíntese por meio de diversos fatores, a exemplo da limitação na abertura e fechamento dos estômatos que reduz a fixação do CO_2 , levando conseqüentemente, à redução dos teores de pigmentos fotossintéticos, comprometendo a captura de luz solar (Ladikou et al., 2025).

Em hortaliças folhosas, a exemplo da chicória e da couve, a deficiência de K desencadeou um aumento no índice de extravasamento de eletrólitos, diminuindo os níveis de pigmentos fotossintetizantes, a fotossíntese e conseqüentemente a área foliar, o número de folhas, diâmetro do caule e a biomassa da parte aérea e das raízes (Alves et al., 2024a; Alves et al., 2024b).

Dessa forma, na deficiência de K, é notável que há baixa concentração de clorofila nas folhas, descrito também em outras espécies como o algodão, em que as plantas sob deficiência de K tiveram apenas 12% do teor total de clorofila encontrado em plantas com níveis adequados do K, havendo também uma

diminuição da altura da planta, redução da massa seca do caule, folhas e raízes (Zhao; Oosterhuis; Bednarz, 2001).

Portanto, todos os danos causados pela deficiência do nutriente no metabolismo da planta acabam gerando perda de produtividade, além do surgimento de sintomas visuais, que ocorrem primeiramente nas folhas mais velhas, pelo fato de o K ser um nutriente móvel (Meena et al., 2016).

2.3. Silício na atenuação da deficiência de potássio

O Si está presente na constituição dos minerais e das rochas, sendo encontrado na crosta terrestre na forma de dióxido de Si (SiO_2) (Santos et al., 2021). É considerado um elemento benéfico para as plantas, apesar de não ser classificado como nutriente, pode proporcionar melhorias no metabolismo vegetal, especialmente em condições de estresses bióticos e abióticos (Prado et al., 2024).

A absorção do Si pelas plantas ocorre na forma de ácido monossilícico (Santos et al., 2021) e nano-Si (Grewal et al., 2024). Após ser absorvido pelas raízes, o Si é transportado até o caule e folhas, onde contribui para o fortalecimento da parede celular por meio de sua precipitação (Cassel et al., 2021).

A partir da capacidade de absorção e acúmulo do Si nas estruturas, as plantas podem ser classificadas como espécies acumuladoras, a exemplo de espécies da família Poaceae, que apresentam os teores do Si acima de 10 g kg^{-1} na planta; espécies que são consideradas intermediárias ($5 \text{ a } 10 \text{ g kg}^{-1}$) e as espécies não-acumuladoras, como as dicotiledôneas, que apresentam baixa absorção e baixo acúmulo do elemento nos órgãos, com teores abaixo de 5 g kg^{-1} (Barreto e Barão, 2023).

Diante disso, os benefícios proporcionados pelo Si podem ser notados principalmente em situações de estresses, quer seja os bióticos (a exemplo de pragas e doenças) ou abióticos como deficiência de nutrientes, ou a combinação de múltiplos estresses (Prado et al., 2024). O elemento atua proporcionando mecanismos que aumentam a eficiência dos nutrientes, favorecendo a absorção por meio da ação de transportadores na raiz e otimizando a translocação para a parte aérea (Ali et al., 2020).

Ademais, a capacidade do Si de se depositar abaixo da cutícula e formar uma dupla camada de sílica possibilita uma melhora no posicionamento das folhas, tornando-as mais eretas, fazendo com que tenha maior incidência e absorção de luz, havendo conseqüentemente, uma otimização na atividade fotossintética (Locarno; Fochi; Paiva, 2011).

Conforme mencionado anteriormente, o fornecimento do Si pode atenuar sintomas de deficiência nutricional nas plantas, a exemplo da deficiência de K (Caione, 2023). Essa atenuação, conforme já descrito, vem dessa possibilidade de melhoria no metabolismo, principalmente pelas plantas suplementadas com esse elemento apresentarem um aumento na síntese de compostos antioxidantes, reduzindo assim, a ação de ERO sob as membranas das células (Prado et al., 2024).

No amendoim sob condições de deficiência de K, o fornecimento do Si interferiu positivamente na modulação do sistema antioxidante enzimático e não enzimático, diminuindo os efeitos do processo oxidativo e possibilitando uma redução do índice de extravasamento de eletrólitos, devido à ação positiva sobre a estabilidade da membrana celular (Patel; Fatnani; Parida, 2022).

Na cultura do sorgo que também é uma espécie acumuladora do Si, o fornecimento do elemento em condições de deficiência de K, possibilitou a redução do amarelecimento e da necrose foliar, mediante a melhorias no metabolismo da planta, como a redução dos níveis de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) na célula, diminuição do acúmulo de poliamina putrescina e da atividade da amina oxidase (Chen et al., 2016).

Nas plantas de quinoa sob deficiência de K, o Si contribuiu para o bom funcionamento do sistema fotossintético, pois diminuiu a razão entre a fluorescência mínima (F_0) e fluorescência máxima (F_m) (F_0/F_m), cujo aumento pode indicar estresse, favorecendo assim, a eficiência fotoquímica do fotossistema II (Sales et al., 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Sementes de pimentão foram germinadas em fibra de coco, a qual é utilizada como meio de cultivo inerte. Quinze dias após a emergência das plântulas, as mesmas foram transferidas para vasos de polietileno de 1,5 dm³, contendo areia lavada como substrato, seguindo o procedimento descrito por Lima-Filho et al. (2018). A temperatura e umidade foram registradas com termohigrômetro, com média de 30°C e 57 % de umidade relativa na casa de vegetação durante todo o período experimental (Fig. 1).

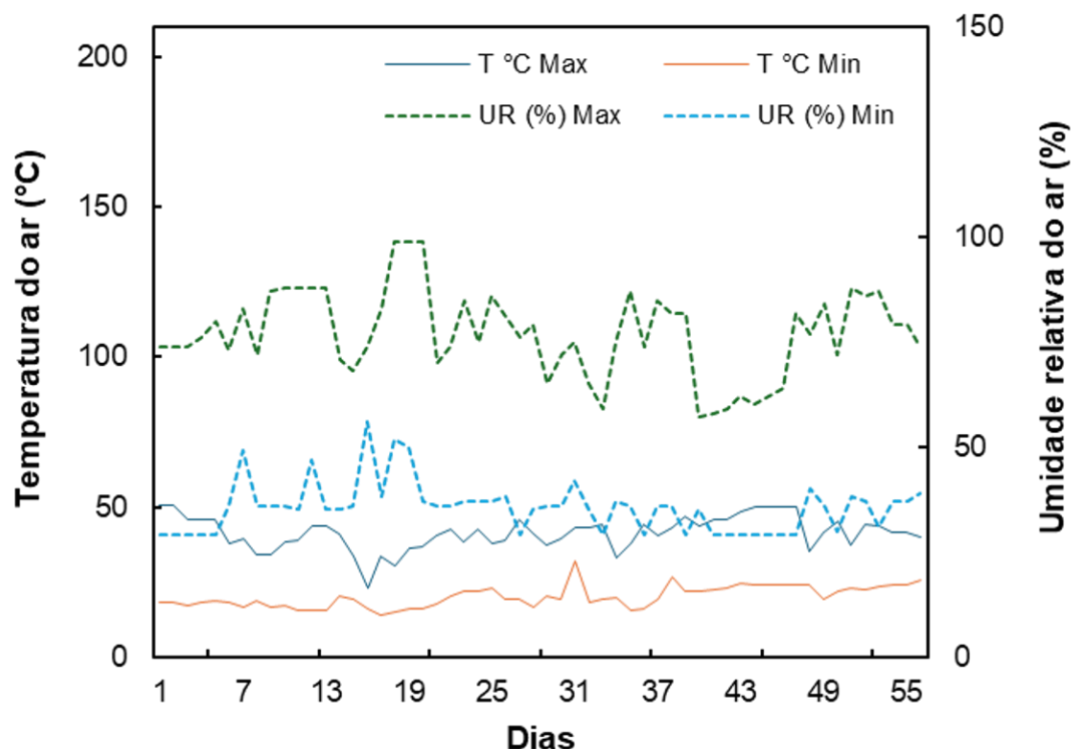


Figura 1. Valores máximos (max) e mínimos (min) diários de temperatura do ar e de umidade relativa do ar monitorados durante o período experimental.

O cultivo foi realizado em casa de vegetação, no Departamento de Ciência do Solo, da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no município de Jaboticabal, São Paulo, Brasil. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com esquema fatorial 2x2, tendo as condições do K adequado ($3,6 \text{ mmol L}^{-1}$) e deficiente ($0,0 \text{ mmol L}^{-1}$), combinadas com a ausência ou presença do Si ($2,0 \text{ mmol L}^{-1}$), utilizando nanossílica Bindizil®. Quatro tratamentos foram estabelecidos, cada um com quatro repetições.

Nos primeiros seis dias após o transplântio, as plantas receberam apenas água deionizada. Posteriormente, uma solução nutritiva modificada de Hoagland e Arnon (1950) foi introduzida gradualmente, iniciando com 5% da força iônica total e fornecida a todos os tratamentos. Ao longo dos 20 dias seguintes, a

concentração da solução nutritiva foi progressivamente aumentada para 50%. Para os tratamentos com deficiência de K, a concentração do K foi ajustada e mantida em 0,0 mmol L⁻¹. Aos 27 dias após o transplântio, a concentração da solução foi elevada para 60%, permanecendo constante até a conclusão do experimento (Tabela 1). Os vasos foram lixiviados semanalmente, até que o lixiviado atingisse 0,010 mS cm⁻¹ de condutividade elétrica. O experimento foi conduzido por um período de 58 dias, após a realização do transplântio.

Fertilizantes	Tratamentos			
	+K-Si	+K+Si	-K-Si	-K+Si
	-----mL L ⁻¹ -----			
KH ₂ PO ₄ (Mol L ⁻¹)	1	1	-	-
KNO ₃ (Mol L ⁻¹)	5	5	-	-
Ca (NO ₃) ₂ .4H ₂ O (Mol L ⁻¹)	5	5	5	5
MgSO ₄ .7H ₂ O (Mol L ⁻¹)	2	2	2	2
NH ₄ H ₂ PO ₄ (Mol L ⁻¹)	-	-	1	1
NH ₄ NO ₃ (Mol L ⁻¹)	-	-	2	2
Solução de micros (*)	1	1	1	1
Solução Fe EDDHA (**)	1	1	1	1
Nano-Si	-	2	-	2

(*) - Em 1L: 2,86 g H₃BO₃; 1,81 g MnCl₂.4H₂O; 0,22 g ZnSO₄.7H₂O; 0,04 g CuCl₂; 0,02 g H₂MoO₄H₂O.

(**) - Fe-EDDHA com 6% de Fe (83,33 g L⁻¹).

Tabela 1. Composição química da solução nutritiva, com as respectivas quantidades de nutrientes e descrição dos tratamentos aplicados durante o experimento.

3.1. Avaliações fisiológicas

3.1.1. Teores de clorofilas

A coleta das amostras foliares de 0,025 a 0,030 g de folhas velhas foram realizadas 58 dias após o transplântio, sendo colocadas em tubos eppendorf cobertos com papel alumínio e preenchidos com 1,5 mL de acetona a 80% de

concentração. Posteriormente, foram armazenadas em ambiente refrigerado (2 a 4 °C), até a despigmentação completa. Depois da despigmentação, uma porção do extrato foi colocada em espectrofotômetro para análise de diferentes comprimentos de onda, sendo considerados para clorofila a (663,2 nanômetros), clorofila b (646,8 nanômetros), e os resultados utilizados para o cálculo da clorofila total (a+b), conforme proposto por Lichtenthaler (1987).

3.1.2. Índice de extravasamento de eletrólitos

Aos 58 dias após o transplântio, foram coletados 10 discos foliares, sendo estes discos inseridos em béqueres preenchidos com 20 mL de água deionizada e mantidos por um período de 2 horas. Posteriormente, foi medida a condutividade elétrica inicial. Os béqueres foram levados para a autoclave, permanecendo por 20 minutos a 121° C. Em seguida, após os béqueres atingirem temperatura ambiente (25°C), a condutividade elétrica final foi medida. O índice de extravasamento de eletrólitos foi calculado por meio da razão entre a condutividade elétrica inicial e a condutividade elétrica final, multiplicada por 100 (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

3.1.3. Eficiência da conversão de energia absorvida

As medições da fluorescência mínima (F_0) e a máxima (F_m) foram realizadas 56 dias após o transplântio, em uma folha velha totalmente expandida, com a utilização de um fluorômetro portátil, entre 7 horas às 9 horas. Por meio dos parâmetros medidos, foi calculada a fluorescência variável (F_v) e a eficiência da conversão de energia absorvida (F_v/F_0) (Lichtenthaler et al., 2005).

3.2. Avaliação bioquímica

3.2.1. Compostos fenólicos

Aos 57 dias após o transplântio, foi coletado 0,05 g de tecido de uma folha madura da planta. Essa amostra passou por um método de extração com metanol e uma etapa colorimétrica com folin-ciocalteu e carbonato de sódio a 20%, e a leitura foi realizada na absorbância de 765 nanômetros no espectrofotômetro (Singleton e Rossi, 1965).

3.3. Avaliações biométricas

As avaliações foram realizadas aos 58 dias após o transplântio. Por meio da utilização de uma régua, foi medida a altura das plantas. Posteriormente, o diâmetro do caule foi medido com um paquímetro digital. Para a determinação do número de folhas, as mesmas foram contadas.

3.4. Avaliações de biomassa

Aos 58 dias após o transplântio, as folhas e raízes foram coletadas e lavadas com água corrente, solução detergente (0,1% v/v), solução de ácido clorídrico (0,3% v/v) e água deionizada (Prado, 2021). Posteriormente, foram colocadas em estufa a 65 °C para secagem até que atingissem massa constante. Após esse processo, as massas secas da parte aérea e das raízes foram determinadas com a utilização da balança analítica de precisão.

3.5. Determinação dos teores do K e do Si

Após a medição da massa seca da parte aérea e da raiz, o material vegetal foi moído em moinho de facas. Foi utilizado 0,100 g do material moído para determinar o teor do K. Para isso, as amostras foram digeridas com uma

mistura de ácidos nítrico e perclórico, seguida da diluição das soluções e quantificação espectrofotômetro de absorção atômica (Bataglia et al., 1978).

Para a determinação do teor do Si, foi utilizado 0,100 g do material moído e colocado em tubos Falcon de 50 mL. A análise foi realizada em duas etapas. Primeiramente, o Si foi extraído com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e hidróxido de sódio (NaOH), de acordo com o procedimento de Kraska e Breitenbeck (2010). Na segunda etapa, uma reação colorimétrica foi realizada com ácido clorídrico, ácido oxálico e molibdato de amônio para quantificar o Si, seguindo o protocolo descrito por Korndörfer et al. (2004).

3.6. Análise dos resultados

Os dados foram inicialmente avaliados quanto à normalidade e à homogeneidade da variância, por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Após as suposições serem satisfeitas, o conjunto de dados foi analisado por meio da análise de variância (ANOVA) e a significância foi verificada pelo teste F. As comparações de médias foram realizadas pelo teste de Tukey, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o programa AgroEstat.

4. RESULTADOS

Os teores do K nas folhas e nas raízes foram menores na deficiência de K (com e sem o Si) comparados ao teor em suficiência do nutriente na presença e ausência do Si. As plantas com suficiência de K que receberam o Si apresentaram maior teor do nutriente nas folhas do que as que não receberam o elemento na mesma condição do K. No entanto, nenhuma diferença em relação ao teor do K nas folhas foi observada no pimentão entre a deficiência de

K com e sem o Si. Nos teores do K nas raízes não foram apresentadas diferenças com a aplicação do Si nas condições de K suficiência e deficiência (Fig. 2A e B).

O teor do Si nas folhas foi maior nas plantas que receberam o elemento benéfico em relação às que não o receberam. Na deficiência de K, o teor do Si nas folhas foi maior em relação à suficiência (Fig. 2C). O teor do Si nas raízes apresentou resultados similares, pois as plantas que receberam o elemento benéfico apresentaram os maiores teores do Si em relação as que não o receberam, em condição de deficiência de K e suficiência de K (Fig. 2D).

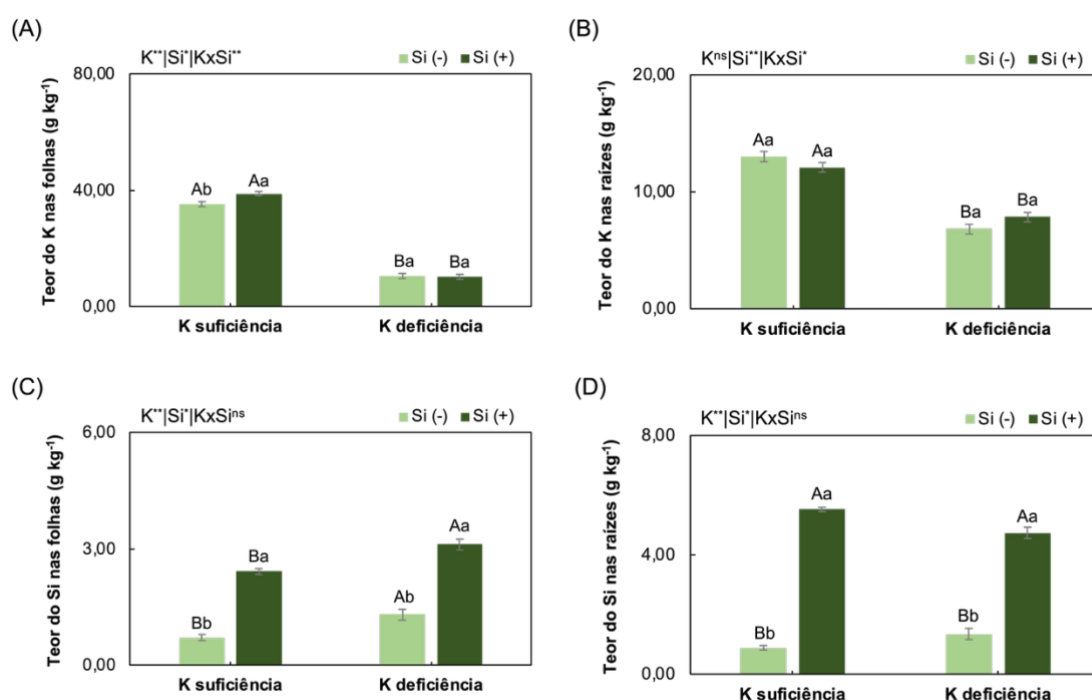


Figura 2. Teor do K nas folhas (A), teor do K nas raízes (B), teor do Si nas folhas (C) e teor do Si nas raízes (D) do pimentão com deficiência de potássio (K) com presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do K dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) e as minúsculas indicam diferenças entre a presença ou ausência do Si no mesmo nível do K ($p < 0,05$).

As plantas sob deficiência de K com o Si apresentaram menores índices de extravasamento de eletrólitos em relação à deficiência sem o Si. Por outro lado, não houve diferença para o índice de extravasamento de eletrólitos em plantas sob suficiência de K, na presença e na ausência do Si (Fig. 3A).

O teor de clorofila total foi menor em plantas com deficiência de K (com e sem o Si), em comparação com as plantas sob suficiência do nutriente, na presença e ausência do Si. Na deficiência de K com o Si houve um aumento no teor de clorofila total em relação a mesma condição do nutriente sem o Si, o mesmo ocorreu na suficiência de K (Fig. 3B).

O teor de compostos fenólicos foi maior na deficiência de K (com e sem o Si) comparados ao teor em suficiência do nutriente na presença e ausência do Si. Por outro lado, a F_v/F_0 foi menor na deficiência de K (com e sem Si) em relação às plantas com suficiência de K que receberam ou não o elemento benéfico. As plantas que receberam o Si apresentaram os maiores teores de compostos fenólicos e maior F_v/F_0 em relação às plantas que não receberam, nas condições de deficiência de K e suficiência de K (Fig. 3C e D).

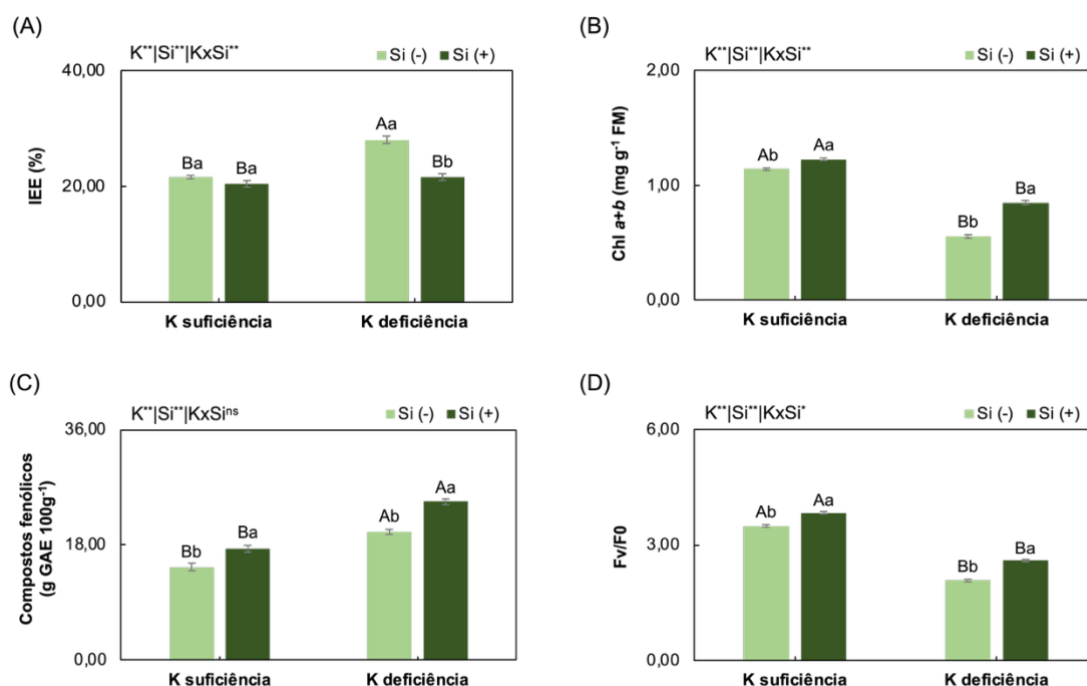


Figura 3. Índice de extravasamento de eletrólitos (IEE, A), clorofila total (Chl a+b, B), compostos fenólicos (C) eficiência da conversão de energia absorvida (F_v/F_0 , D) do pimentão com deficiência de potássio (K) com presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do K dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) e as minúsculas indicam diferenças entre a presença ou ausência do Si no mesmo nível do K ($p < 0,05$).

Não houve diferença na aplicação do Si para o número de folhas em plantas sob deficiência de K em relação às plantas sem o Si, sob a mesma condição do K. Contudo, as plantas sob suficiência de K que receberam o Si apresentaram maior número de folhas em relação às plantas que não receberam o elemento benéfico na mesma condição do K (Fig. 4A). As plantas com suficiência de K apresentaram maior altura em relação às plantas com deficiência de K. Contudo, as plantas com deficiência de K na presença do Si não diferiram em relação à deficiência de K na ausência do Si, o mesmo ocorreu na suficiência de K (Fig. 4B).

O diâmetro do caule foi maior em plantas com suficiência de K (com e sem Si) em relação à deficiência de K, na presença e ausência do Si. As plantas que receberam o Si, na deficiência e na suficiência de K, apresentaram maior diâmetro do caule em relação às plantas que não receberam o Si (Fig. 4C).

A massa seca da parte aérea e a massa seca das raízes foram superiores nas plantas cultivadas sob suficiência de K em comparação com aquelas sob deficiência de K. Além disso, na condição de suficiência de K, a adição do Si promoveu um incremento na massa seca da parte aérea, em relação à suficiência de K sem a aplicação do Si. Contudo, não houve diferença na massa seca das raízes com a aplicação do Si na condição de suficiência de K em relação à suficiência de K sem adição do Si. Por outro lado, na condição de deficiência de K, as plantas que receberam o Si apresentaram maiores massas secas da parte aérea e das raízes em relação às plantas que, sob deficiência de K, não receberam a aplicação do Si (Fig. 4D e E).

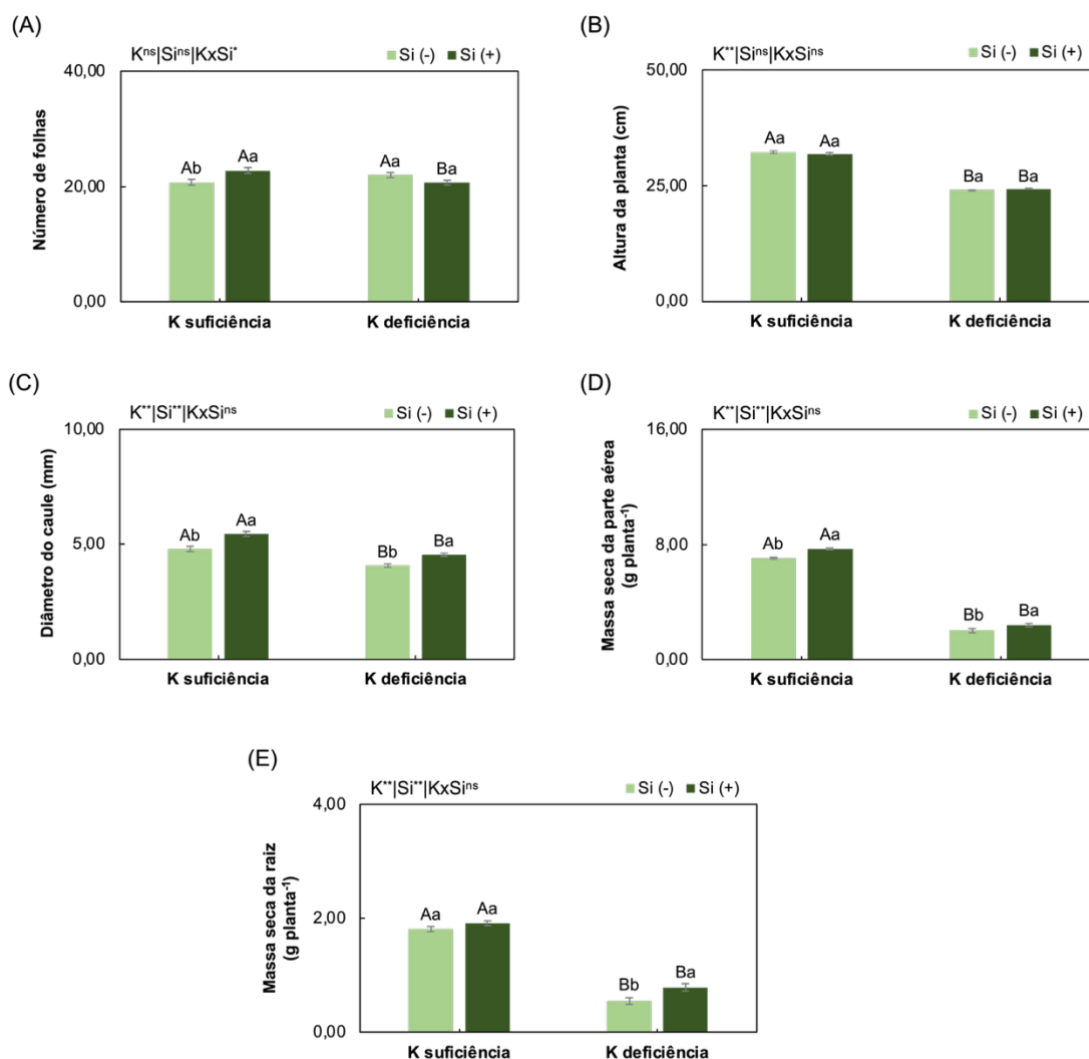


Figura 4. Número de folhas (A), altura da planta (B), diâmetro do caule (C), massa seca da parte aérea (D), massa seca da raiz (E) do pimentão com deficiência de potássio (K) com presença (+) ou ausência (-) do silício (Si). As barras representam o erro padrão. As letras maiúsculas indicam diferenças entre as concentrações do K dentro do mesmo nível do Si ($p < 0,05$) e as minúsculas indicam diferenças entre a presença ou ausência do Si no mesmo nível do K ($p < 0,05$).

5. DISCUSSÃO

Os teores de nutrientes no tecido vegetal indicam o estado nutricional da planta (Fontes, 2014). Em plantas sob deficiência de K, ocorre um menor desenvolvimento do sistema radicular, e isso interfere na absorção do K pela planta (Guan et al., 2025). As plantas de pimentão com deficiência de K apresentaram menores teores do K nas folhas e raízes em relação à suficiência de K (Fig. 2A e B). Ademais, não houve diferença nos teores do K nas folhas e

raízes entre plantas com e sem Si sob deficiência de K (Fig. 2A e B). Contudo, a aplicação do Si possibilitou incrementar o teor do Si nas folhas e nas raízes na suficiência e na deficiência de K (Fig. 2C e D), devido a fonte aplicada de nanopartículas de Si serem de tamanho reduzido, favorecendo a absorção do elemento pela planta (Grewal et al., 2024).

O índice de extravasamento de eletrólitos (IEE) é uma variável que indica o nível de dano celular, baseado na perda de integridade da membrana plasmática e morte celular consequente desse fato (Hatsugai e Katagiri, 2018). Em plantas de pimentão com deficiência de K, houve um aumento no índice de extravasamento de eletrólitos (Fig. 3A), que pode ser desencadeado pela produção excessiva de ERO (Bang et al., 2021). Em plantas com deficiência de K que foram aplicadas o Si, ocorreu uma redução do IEE (Fig. 3A), devido à otimização do sistema antioxidante não enzimático, pois houve um aumento na produção de compostos fenólicos (Fig. 3C), os quais neutralizam os efeitos provocados pelo excesso de ERO, contribuindo para a estabilidade da membrana celular (Alves et al., 2024a).

A clorofila (Chl) é um pigmento fotossintético responsável pela coloração verde das folhas que auxilia na transferência de elétrons durante a fotossíntese, por meio do recebimento da energia luminosa, e sua degradação indica processos acelerados de senescência das plantas (Tanaka e Ito, 2024). A deficiência de K nas plantas potencializa a degradação oxidativa da clorofila, devido à produção excessiva de ERO (Cakmak, 2005). O teor de Chl total em plantas de pimentão sob deficiência de K foi menor em relação às plantas com suficiência de K, porém a aplicação do Si favoreceu a quantidade de Chl total na deficiência de K em relação às plantas que não receberam o elemento benéfico

(Fig. 3B). Esse fato pode ser explicado devido a uma possível redução na degradação desse pigmento fotossintético nas plantas frente a diminuição do índice de extravasamento de eletrólitos (Fig. 3A), por meio do aumento da produção de substâncias antioxidantes não enzimáticas, as quais neutralizam o estresse oxidativo provocado pelos radicais livres, preservando o teor de Chl (Alves et al., 2024a).

Os compostos fenólicos são substâncias antioxidantes que atenuam os efeitos negativos provocados pelas ERO em plantas sob estresse, contribuindo para a manutenção da estrutura celular (Michalak, 2006), podendo observar um aumento na concentração dos compostos fenólicos nas plantas de pimentão sob deficiência de K, em resposta ao estresse oxidativo (Fig. 3C). O Si aumentou a concentração desses compostos em plantas sob deficiência de K (Fig. 3C), por meio da otimização da atividade das enzimas que atuam na síntese dos compostos fenólicos, como por exemplo, a fenilalanina amônia liase e tirosina amônia liase (Dar et al., 2022).

Os parâmetros de eficiência da conversão de energia absorvida (F_v/F_0) são usados para avaliar a eficiência fotoquímica e a funcionalidade do fotossistema II (PSII), sendo valores reduzidos um indicativo de que há menor eficiência potencial da fotossíntese (Kooten e Snel, 1990). O pimentão com deficiência de K apresentou uma redução da F_v/F_0 , porém a aplicação do Si possibilitou otimizar esse parâmetro (Fig. 3D). Em plantas sob condições de estresse, o fornecimento do Si possibilita o incremento nessa variável, permitindo a conversão eficiente da energia luminosa em energia química (Chen et al., 2011). Esse fato ocorre devido à capacidade do Si em reduzir o acúmulo

de energia não dissipada e atenuar a produção excessiva de ERO, refletindo em uma melhor eficiência na utilização da energia luminosa (Cao; Ma; Xu, 2020).

As plantas sob deficiência de K apresentam uma diminuição no crescimento e menor produção de biomassa, devido à redução nos teores de clorofilas e baixa atividade fotossintética (Fontana et al., 2020). A diminuição do diâmetro do caule em plantas sob deficiência de K ocorre devido à redução da quantidade de células parenquimatosas (Attia et al., 2022).

Em plantas de pimentão sob deficiência de K, não houve diferença para o número de folhas, entre plantas com e sem o Si (Fig. 4A). Além disso, na altura das plantas sob deficiência de K com o uso do Si não houve diferenças em relação às plantas sem o Si, na mesma condição do K (Fig. 4B). A hipótese é de que a planta sob deficiência nutricional tenha investido em outra variável, como por exemplo, o crescimento do sistema radicular, com maior alocação de biomassa para as raízes (Poorter et al., 2012), como aconteceu com as plantas de pimentão sob deficiência de K, na presença do Si (Fig. 4E).

Houve um aumento no diâmetro do caule após a aplicação do Si em plantas de pimentão com deficiência de K em relação as que não receberam o elemento na mesma condição do K (Fig. 4C). Ademais, houve maior produção de massa seca da parte aérea e massa seca das raízes, com a aplicação do Si em plantas de pimentão deficientes em K em relação às plantas sem Si na mesma condição do K (Fig. 4D e E). Esse aumento nas variáveis de crescimento ocorre devido à capacidade do Si em otimizar o metabolismo da planta, interferindo em alguns processos, podendo destacar o incremento no teor de clorofila e a melhora da fotossíntese (Harter e Barros, 2011).

6. CONCLUSÃO

A aplicação do Si em plantas sob deficiência de K possibilitou incrementar os teores do Si nas folhas e raízes, e favorecer o teor de Chl total. Além disso, melhorou a eficiência fotoquímica das plantas, aumentou o diâmetro do caule e favoreceu a produção de massa seca. Ademais, promoveu a redução do estresse oxidativo nas plantas, devido ao incremento no conteúdo de substâncias antioxidantes não enzimáticas. Em plantas sob suficiência de K, o fornecimento do Si possibilitou incrementar o teor do K nas folhas, e teores do Si nas folhas e raízes. Ademais, favoreceu o teor de Chl total, otimizou o sistema antioxidante e melhorou a eficiência fotoquímica das plantas. Além disso, possibilitou incrementar o número de folhas, diâmetro do caule e massa seca da parte aérea. Portanto, o Si se apresenta como uma alternativa para atenuar a deficiência de K e potencializar o crescimento sob suficiência de K na cultura do pimentão.

REFERÊNCIAS

- AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O.; MIYAZAKI, A.; KUBOTA, F.; AGATA, W.; Kaufman, P. B. Effects of Silicon on Tolerance to Water Deficit and Heat Stress in Rice Plants (*Oryza sativa* L.), Monitored by Electrolyte Leakage. **Plant Production Science**, v. 1, n. 2, p. 96-103, 1998.
- ALBERONI, R. de B. **Hidroponia: como instalar e manejar o plantio**. NBL Editora, 1997.
- ALI, N.; RÉTHORÉ, E.; YVIN, J. C.; HOSSEINI, S. A. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. **Plants**, v. 9, n. 12, p. 1779, 2020.
- ALVES, D. M. R.; PRADO, R. de M.; BARRETO, R. F. Silicon and sodium attenuate potassium deficiency in *Eruca sativa* Mill. **Food Chemistry**, v. 432, p. 137225, 2024b.
- ALVES, D. M. R.; PRADO, R. de M.; BARRETO, R. F.; CARVALHO, L. T. da S. Nano-silicon and sodium mitigate damage by potassium deficiency in chicory. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 16841, 2024a.
- AMTMANN, A.; RUBIO, F. Potassium in plants. **Els**, 2012.
- ANAYA-ESPARZA, L. M.; MORA, Z. V. D. L.; VÁZQUEZ-PAULINO, O.; ASCENCIO, F.; VILLARRUEL-LÓPEZ, A. Bell peppers (*Capsicum annuum* L.) losses and wastes: Source for food and pharmaceutical applications. **Molecules**, v. 26, n. 17, p. 5341, 2021.
- ATTIA, H.; REBAH, F.; OUHIBI, C.; SALEH, M. A.; ALTHOBAITI, A. T.; ALAMER, K. H.; NASRI, M. B.; LACHAËL, M. Effect of potassium deficiency on physiological responses and anatomical structure of basil, *Ocimum basilicum* L. **Biology**, v. 11, n. 11, p. 1557, 2022.
- BANG, T. C. de; HUSTED, S.; LAURSEN, K. H.; PERSSON, D. P.; SCHJOERRING, J. K. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. **New Phytologist**, v. 229, n. 5, p. 2446-2469, 2021.
- BARRETO, R. F.; BARÃO, L. Silicon: Transcellular and apoplastic absorption and transport in the xylem. In: **Benefits of silicon in the nutrition of plants**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 17-25.
- BASAK, B. B.; MAITY, A.; RAY, P.; BISWAS, D. R.; ROY, S. Potassium supply in agriculture through biological potassium fertilizer: A promising and sustainable option for developing countries. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 101-114, 2022.
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. (1978). Métodos de análise química de plantas. Campinas: IAC.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v. 8, p. 107-137, 2012.

BOTELLA, M. Á.; ARÉVALO, L.; MESTRE, T. C.; RUBIO, F.; GARCÍA-SÁNCHEZ, F.; RIVERO, R. M.; MARTÍNEZ, V. Potassium fertilization enhances pepper fruit quality. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 2, p. 145-155, 2017.

CAIONE, G. Silicon alleviating potassium and phosphorus deficiency in plants. In: **Benefits of silicon in the nutrition of plants**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 101-112.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 168, n. 4, p. 521-530, 2005.

CAO, B.; MA, Q.; XU, K. Silicon restrains drought-induced ROS accumulation by promoting energy dissipation in leaves of tomato. **Protoplasma**, v. 257, n. 2, p. 537-547, 2020.

CASSEL, J. L.; GYSI, T.; ROTHER, G. M.; PIMENTA, B. D.; LUDWIG, R. L.; SANTOS, D. B. dos. Benefícios da aplicação de silício em plantas. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 4, p. 6601-6615, 2021.

CHÁVEZ-MENDOZA, C.; SANCHEZ, E.; MUÑOZ-MARQUEZ, E.; SIDA-ARREOLA, J. P.; FLORES-CORDOVA, M. A. Bioactive compounds and antioxidant activity in different grafted varieties of bell pepper. **Antioxidants**, v. 4, n. 2, p. 427-446, 2015.

CHEN, D.; CAO, B.; QI, L.; YIN, L.; WANG, S.; DENG, X. Silicon-moderated K-deficiency-induced leaf chlorosis by decreasing putrescine accumulation in sorghum. **Annals of Botany**, v. 118, p. 305-315, 2016.

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

CROSBY, K. M. Pepper. In: **Vegetables II: Fabaceae, Liliaceae, Solanaceae, and Umbelliferae**. New York, NY: Springer New York, 2008. p. 221-248.

DAR, F. A.; TAHIR, I.; HAKEEM, K. R.; REHMAN, R. U. Silicon application enhances the photosynthetic pigments and phenolic/flavonoid content by modulating the phenylpropanoid pathway in common buckwheat under aluminium stress. **Silicon**, v. 14, n. 1, p. 323-334, 2022.

DHOLWANI, S. J.; MARWADI, S. G.; PATEL, V. P.; DESAI, V. P. Introduction of Hydroponic system and it's Methods. **International Journal of Recent Technology Engineering**, v. 3, n. 3, p. 69-73, 2018.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, 135, 1-9, 1998.

DOTANIYA, M. L.; MEENA, V. D.; BASAK, B. B.; MEENA, R. S. Potassium uptake by crops as well as microorganisms. **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**, p. 267-280, 2016.

EL-BASSIONY, A. M.; FAWZY, Z. F.; ABD EL-SAMAD, E. H.; RIAD, G. S. Growth, yield and fruit quality of sweet pepper plants (*Capsicum annuum* L.) as affected by potassium fertilization. **Journal of American Science**, v. 6, n. 12, p. 722-729, 2010.

EL-GHORAB, A. H.; JAVED, Q.; ANJUM, F. M.; HAMED, S. F.; SHAABAN, H. A. Pakistani bell pepper (*Capsicum annuum* L.): chemical compositions and its antioxidant activity. **International Journal of Food Properties**, v. 16, n. 1, p. 18-32, 2013.

EMMANUEL-IKPEME, C.; HENRY, P.; OKIRI, O. A. Comparative evaluation of the nutritional, phytochemical and microbiological quality of three pepper varieties. **Journal of food and nutrition sciences**, v. 2, n. 3, p. 74-80, 2014.

FONTANA, J. E.; WANG, G.; SUN, R.; XUE, H.; LI, Q.; LIU, J.; DAVIS, K. E.; THORNBURG, T. E.; ZHANG, B.; ZHANG, Z.; PAN, X. Impact of potassium deficiency on cotton growth, development and potential microRNA-mediated mechanism. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 153, p. 72-80, 2020.

FONTES, P. C. R. Nutrição mineral de hortaliças: horizontes e desafios para um agrônomo. **Horticultura Brasileira**, v. 32, n. 3, p. 247-253, 2014.

GHASEMNEZHAD, M.; SHERAFATI, M.; PAYVAST, G. A. Variation in phenolic compounds, ascorbic acid and antioxidant activity of five coloured bell pepper (*Capsicum annuum*) fruits at two different harvest times. **Journal of functional foods**, v. 3, n. 1, p. 44-49, 2011.

GOVINDARAJAN, V. S.; SALZER, U. J. *Capsicum*-production, technology, chemistry, and quality part 1: History, botany, cultivation, and primary processing. **Critical Reviews in Food Science & Nutrition**, v. 22, n. 2, p. 109-176, 1985.

GREWAL, S.; BOORA, R.; KUMARI, S.; THAKUR, R.; GOEL, S. Fascinating aspects of nanosilicon enabled plant stress tolerance—A comprehensive review. **Plant Nano Biology**, v. 8, p. 100077, 2024.

GUAN, K.; LI, Y.; ZHANG, Y.; YANG, J.; GE, Z.; DAI, X. Transcriptomic and physiological insights into auxin-mediated root growth and potassium uptake in tobacco under low-potassium stress. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 664, 2025.

HARTER, F. S.; BARROS, A. C. S. A. Cálcio e silício na produção e qualidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, p. 54-60, 2011.

HATSUGAI, N.; KATAGIRI, F. Quantification of plant cell death by electrolyte leakage assay. **Bio-protocol**, v. 8, n. 5, p. e2758-e2758, 2018.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. **Circular. California Agricultural Experiment Station**, v. 347.

KOOTEN, O. van; SNEL, J. F. H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. **Photosynthesis research**, v. 25, n. 3, p. 147-150, 1990.

KORNDÖRFER G.H.; PEREIRA H.S.; NOLLA A (Eds) (2004) Análise de silício no solo, planta e fertilizantes. Uberlândia: UFU, 50p.

KRASKA, J. E.; BREITENBECK, G. A. (2010). Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41, 2075-2085.

LADIKOU, E.-V.; DARAS, G.; LANDI, M.; CHATZISTATHIS, T.; SOTIROPOULOS, T.; RIGAS, S.; PAPADAKIS, I. E. Physiological and Biochemical Effects of Potassium Deficiency on Apple Tree Growth. *Horticulturae*, v. 11, n. 1, p. 42, 2025.

LICHTENTHALER, H. K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In *Methods in enzymology*. **Academic Press**, 148, 350-382.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; KNAPP, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio Rfd of leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica*, v. 43, n. 3, p. 379–393, 2005.

LIMA-FILHO, O. F. de; SILVA, M. S. da; VAREIRO, W. P. de O.; ZANUTTO, R. P. Limpeza de areia para experimentos em nutrição de plantas. Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E). 2018.

LIU, W. Y.; KANG, W.-H.; KANG, B.-C. Basic Information on Pepper. **Genetics, Genomics and Breeding of Peppers and Eggplants**, v. 1, 2013.

LOCARNO, M.; FOCHI, C. G.; PAIVA, P. D. de O. Influência da adubação silicatada no teor de clorofila em folhas de roseira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, p. 287-290, 2011.

LOPES, S. M.; ALCANTRA, E.; REZENDE, R. M.; FREITAS, A. S. de. Avaliação de frutos de pimentão submetidos ao ensacamento no cultivo orgânico. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 1, 2018.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. **Studies in plant Science**, v. 8, p. 17-39, 2001.

MADHAVI R., K.; SHIVASHANKARA, K. S.; GEETHA, G. A.; PAVITHRA, K. C. Capsicum (hot pepper and bell pepper). **Abiotic stress physiology of horticultural crops**, p. 151-166, 2016.

MANNING, D. AC. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review. **Agronomy for sustainable development**, v. 30, p. 281-294, 2010.

MASSIMI, M.; RADOZ, L. The Action of nutrients deficiency on growth biometrics, physiological traits, production indicators, and disease development in pepper (*Capsicum annuum* L.) plant: A review. 2021.

MEENA, V. S.; MAURYA, B. R.; VERMA, J. P.; MEENA, R. S. **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**. New Delhi: Springer, 2016.

- MICHALAK, A. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. **Polish journal of environmental studies**, v. 15, n. 4, 2006.
- MOSTOFA, M. G.; RAHMAN, M. M.; ANSARY, M. M. U.; KEYA, S. S.; ABDELRAHMAN, M.; MIAH, M. G.; PHAN TRAN, L. S. Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. **Critical Reviews in Biotechnology**, v. 41, n. 6, p. 918-934, 2021.
- NADEEM, M.; ANJUM, F. M.; KHAN, M. R.; SAEED, M.; RIAZ, A. Antioxidant potential of bell pepper (*Capsicum annuum* L.)-A review. **Pakistan Journal of Food Science**, v. 21, n. 1-4, p. 45-51, 2011.
- NASCIMENTO, A. M. do; SILVA, J. L. da; GADELHA, T. M.; SILVA, O. S. da; COSTA, F. B. da. COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO PIMENTÃO VERDE (*Capsicum annuum* L.). **Revista de Agroecologia no Semiárido**, v. 3, n. 3, p. 18-18, 2019.
- OLIVEIRA, J. de; NASCIMENTO, D. L. do; VELOSO, C. L.; PRATES, F. B. de S.; TARTAGLIA, F. de L.; SOUZA, A. R. E. de. Performance of colored bell pepper cultivars under different concentrations of nutrient solution. **Comunicata Scientiae**, v. 13, p. 1-9, 2022.
- PATEL, M.; FATNANI, D.; PARIDA, A. K. Potassium deficiency stress tolerance in peanut (*Arachis hypogaea*) through ion homeostasis, activation of antioxidant defense, and metabolic dynamics: Alleviatory role of silicon supplementation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 182, p. 55-75, 2022.
- POORTER, H.; NIKLAS, K. J.; REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; POOT, P.; MOMMER, L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New phytologist**, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.
- PRADO, R. de M. **Nutrição de plantas**. Editora Unesp, 2021.
- PRADO, R. de M.; ALVES, D. M. R.; SOARES, A. de A. V. L. Silicon: the only element in plant nutrition with a mitigating effect on multiple stresses. In: **Silicon Advances for Sustainable Agriculture and Human Health: Increased Nutrition and Disease Prevention**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. p. 41-64.
- PRAJAPATI, K.; MODI, H. A. The importance of potassium in plant growth—a review. **Indian journal of plant sciences**, v. 1, n. 02-03, p. 177-186, 2012.
- PRAKASH, S.; VERMA, J. P. Global perspective of potash for fertilizer production. **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**, p. 327-331, 2016.
- RAJARAMAN, I. Non-renewable resources: A review of long-term projections. **Futures**, v. 8, n. 3, p. 228-242, 1976.
- SALES, A. C.; CAMPOS, C. N. S.; SOUZA JUNIOR, J. P. de; SILVA, D. L. da; OLIVEIRA, K. S.; PRADO, R. de M.; TEODORO, L. P. R.; TEODORO, P. E. Silicon mitigates nutritional stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 14665, 2021.

SANTOS, L. C. dos; SILVA, G. A. M. da; ABRANCHES, M. de O.; ROCHA, J. L. A.; SILVA, S. T. de A.; RIBEIRO, M. D. S.; GOMES, V. R.; SEVERO, P. J. da S.; BRILHANTE, C. L.; SOUSA, F. Q. de. O papel do silício nas plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e3810716247-e3810716247, 2021.

SCIVITTARO, W. B.; MELO, A. M.; TAVARES, M.; AZEVEDO FILHO, J. A. D.; CARVALHO, C. R.; RAMOS, M. T. Characteristics of sweet pepper hybrids obtained under protected cultivation. **Horticultura Brasileira**, v. 17, p. 147-150, 1999.

SHARMA, A.; SHANKHDHAR, D.; SHANKHDHAR, S. C. Potassium-solubilizing microorganisms: mechanism and their role in potassium solubilization and uptake. **Potassium solubilizing microorganisms for sustainable agriculture**, p. 203-219, 2016.

SILVA, M. A. de A.; ESCOBEDO, J. F.; GALVANI, E. Influência da cultura do pimentão (*Capsicum annuum* L.) nos elementos ambientais em ambiente protegido. **Irriga**, v. 7, n. 3, p. 230-240, 2002.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdicphosphotungstic acid reagents. **American journal of Enology and Viticulture**, v. 16, n. 3, p. 144-158, 1965.

TANAKA, A.; ITO, H. Chlorophyll degradation and its physiological function. **Plant And Cell Physiology**, p. pcae093, 2024.

TRECHA, C. de O.; LOVATTO, P. B.; MAUCH, C. R. Entraves do cultivo convencional e as potencialidades do cultivo orgânico do pimentão no Brasil. **Revista Thema**, v. 14, n. 3, p. 291-302, 2017.

ZHANG, Y. S.; GU, S. J.; CHEN, J. J.; CAI, X. D. Effects of different nutrient solutions on the acclimatization of in vitro Caladium plantlets using a simplified hydroponic system. **Sains Malays**, v. 48, p. 1627-1633, 2019.

ZHAO, D.; OOSTERHUIS, D. M.; BEDNARZ, C. W. Influence of potassium deficiency on photosynthesis, chlorophyll content, and chloroplast ultrastructure of cotton plants. **Photosynthetica**, v. 39, n. 1, p. 103-109, 2001.

ZÖRB, C.; SENBAYRAM, M.; PEITER, E. Potassium in agriculture—status and perspectives. **Journal of plant physiology**, v. 171, n. 9, p. 656-669, 2014.