



**SILÍCIO NA FERTILIDADE DO SOLO E NA NUTRIÇÃO DE CUCURBITACEAE
FRENTE A ESTRESSES ABIÓTICOS**

**SILICON IN SOIL FERTILITY AND NUTRITION OF CUCURBITACEAE IN THE
FACE OF ABIOTIC STRESS**

GRAÇA, Genilza Almeida da¹

RESUMO

O silício (Si) é um elemento benéfico para o crescimento das plantas e tem se mostrado crucial na melhoria da fertilidade do solo e na adaptação de plantas da família Cucurbitaceae a estresses ambientais. O Si aumenta a capacidade de retenção de água do solo, auxiliando as Cucurbitaceae na tolerância à seca. Também facilita a absorção de nutrientes essenciais, como o fósforo, melhorando a nutrição das plantas em solos deficientes. Em face de desafios crescentes de estresses abióticos, é necessário a organização das informações contidas na literatura para melhor enfrentar esses desafios, com isso, o presente trabalho tem como principal objetivo trazer por meio de revisão bibliográfica, informações atualizadas sobre o papel do silício na fertilidade do solo e nutrição de cucurbitáceas frente a estresses.

Palavras-chave: Artigo de revisão. Química do solo. Plantas.

ABSTRACT

Silicon (Si) is a beneficial element for plant growth and has been shown to be crucial in improving soil fertility and adapting plants from the Cucurbitaceae family to environmental stresses. Si increases the water retention capacity of the soil, helping Cucurbitaceae with drought tolerance. It also facilitates the absorption of essential nutrients, such as phosphorus, improving plant nutrition in deficient soils. In the face of increasing challenges of abiotic stresses, it is necessary to organize the information contained in the literature to better face these challenges. Therefore, the present work's main objective is to bring, through a bibliographic review, updated information on the role of silicon in fertility. soil and nutrition of cucurbits in the face of stress.

Keywords: Review article. Soil chemistry. Plants.

¹ Bacharelado do curso de Engenharia Agrônômica, pela Universidade Federal de Sergipe e Pós-graduação do curso de Agricultura de Precisão, pela Fasouza, Mestre em Ciências, pela Universidade Federal de Sergipe. Email almeidagenilza@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

As cucurbitáceas na sua grande maioria são hortaliças importantes, cultivadas e consumidas como alimento em muitos países do mundo. De forma geral, são consideradas fonte natural de carotenóides, carboidratos, polissacarídeos flavanóides, alcalóides, tocoferóis, fenóis, terpenóides, saponinas, esteróis, minerais, ácidos graxos, vitaminas, dentre outros.

Entretanto, as alterações climáticas constantes e severas tem afetado o desenvolvimento de plantas causando efeitos adversos perigosos para o crescimento, desenvolvimento, bem como para a síntese de constituintes bioquímicos, processos metabólicos, para a fisiologia vegetal e rendimento final da planta.

As diferentes condições de produção de plantas frente as mudanças climáticas requerem tecnologias eficientes para superar os efeitos prejudiciais de estresses abiótico. Assim, o silício (Si) tem mostrado muitos efeitos benéficos, principalmente em plantas submetidas a diferentes tipos de estresse. A utilização do silício na agricultura precede o pleno entendimento dos benefícios que esse elemento mineral oferece para o crescimento das plantas. Entretanto, é importante notar que o silício não é considerado um nutriente essencial para o desenvolvimento ótimo das plantas, uma vez que sua atuação ocorre de forma indireta. Por essa razão, ele é classificado como um elemento benéfico. Não obstante, o silício desempenha um papel de considerável importância no crescimento de diversas culturas agrícolas. Em plantas de modo geral, é possível observar que o Si pode desempenhar um papel significativo no aumento das taxas de fotossíntese, atribuído ao incremento nos níveis de clorofila. Além disso, a deposição de silício nas folhas pode resultar na redução das taxas de transpiração, conferindo maior resistência às adversidades de natureza não-biológica. Portanto, é de suma importância reunir informações abrangentes sobre o papel do silício nas plantas como um mitigador de estresses de origem não-biológica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. SILÍCIO NO SOLO

O silício é o segundo elemento mais comum na crosta terrestre, presente em 27,7% desta, principalmente na forma de óxidos (SiO_2). No entanto, nem todo silício presente no solo está disponível para as plantas, a maior parte está presa em minerais de silicato recalcitrantes e apenas uma fração muito menor está disponível para as plantas (STRUYF *et al.*, 2010; MALIK *et al.*, 2021).

Os solos brasileiros apresentam em média de 5 a 40% de Si em sua constituição. A presença de óxido de silício nos argilominerais, torna-o o elemento mais abundante no solo, entretanto em decorrência do processo de intemperismo dos solos tropicais, este se encontra na forma de quartzo e opala (MENEGALE, CASTRO, MANCUSO, 2015). O intenso processo de intemperismo, faz com que os minerais primários que são ricos em Si na sua composição sejam praticamente inexistentes nestas condições (PEREIRA, VITT, KORNDORFER, 2003; SANTOS *et al.*, 2021).

Além disso, o Si apresenta baixo poder de agregação quando comparado a outros ions, desta forma, ele apresenta grande mobilidade no perfil do solo, contribuindo dessa forma para o processo de lixiviação, resultando em baixos teores deste elemento nos solos tropicais (MENEGALE, CASTRO, MANCUSO, 2015).

As principais perdas do silício nos solos se dão pela polimerização do ácido silícico, lixiviação e a adsorção promovida pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (KORNDÖRFER, SOUZA, 2018).

O teor de Si solúvel e disponível para as plantas está diretamente ligado ao teor de argila, mineralogia e textura do solo (CAMARGO, 2016). Além destes fatores, o pH do solo é outro fator intimamente ligado a concentração e disponibilidade do silício para as plantas, ou seja, quanto mais elevado o pH do solo, maior será a disponibilidade de Si no solo e sua absorção pelas plantas (CASTRO, CRUSCIOL, 2013).

O Si está presente no solo na forma de ácido monossilícico, prontamente disponível para plantas e Si estrutural presente nos minerais silicatados

(KORNDÖRFER; SOUZA, 2018). O ácido monossilícico, resulta principalmente do processo de decomposição de resíduos vegetais, pois, a ciclagem do Si nos restos culturais de solos intemperizados é considerada a principal fonte de Si para as plantas (KORNDÖRFER; SOUZA, 2018).

No solo, a aplicação do silício é também indicada quando objetiva-se aumentar a saturação de bases e corrigir a acidez do solo, para esta finalidade são utilizadas escórias provenientes de siderúrgicas, como silicato de Ca e Mg (REIS JÚNIOR *et al.*, 2013). Estes materiais apresentam alta solubilidade chegando a ser até 6,78 vezes maior que o carbonato de cálcio, comumente utilizado na agricultura (ALCARDE, RODELLA, 2003; SANTOS *et al.*, 2021). Esta propriedade torna o silicato de Ca e Mg propício de ser utilizado para a correção do solo em profundidade (ALCARDE, RODELLA, 2003; SANTOS *et al.*, 2021). Ramos *et al.* (2006) realizaram um experimento em um Neossolo Quartzarênico Órtico Típico cujo o objetivo foi comparar os efeitos do calcário, gesso e silicatos quanto a sua capacidade em fornecer Ca, Mg, Si e correção do solo em profundidade. Os tratamentos consistiram no uso de silicato de Ca (wollastonita), silicato de Ca e Mg, termofosfato, calcário calcítico e gesso agrícola. Após 40 dias foi observado que o gesso elevou os teores de Ca. A utilização dos silicatos, por sua vez, corrigiu a acidez do solo e contribuiu para aumentar o teor de Ca de forma mais eficiente do que o calcário. A utilização do silicato de Ca e Mg e de termofosfato aumentou consideravelmente o teor de Mg no solo. Além disso, a utilização das fontes silicatadas aumentou o teor de Si no solo, sendo este carregado para as camadas mais profundas.

Em outro estudo realizado, cujo o objetivo foi avaliar a aplicação de silicato de Ca e o seu efeito na correção do solo, por meio da aplicação de seis diferentes doses de SiO₂, (0; 125; 250; 375; 500 e 625 mg kg⁻¹ de solo) na forma de wollastonita, neste estudo, verificou-se que o silicato de cálcio contribuiu para a elevar os valores de pH, os teores de Ca, Mg e Si no solo (BARBOSA FILHO *et al.*, 2001; SANTOS *et al.*, 2021). Com o objetivo de verificar a eficiência de utilização do silicato de Ca em campo, outro experimento foi realizado utilizando doses crescentes de silicato de Ca (0, 700, 1400, 2800, 5600 kg ha⁻¹). Onde o intuito foi avaliar os atributos químicos do

solo. Verificou-se também a elevação do valor de pH, Ca, Mg, Fe, Mn, SB, CTC e V% e diminuiu os teores de (H+Al), MO, Zn, Cu e Si (RAMOS *et al.*, 2013). A presença de Si no solo pode promover a precipitação de elementos tóxicos como o Al, provocado pelo aumento do pH (MALAVOLTA, 2006).

Além disso, a utilização de silicato de cálcio e magnésio pode proporcionar maior disponibilidade de P e Si, dentre outros elementos no solo, contribuindo para maior absorção desses pelas culturas (PULZ *et al.*, 2008).

2.2 SILÍCIO NAS PLANTAS

O silício é um elemento importante que desempenha um papel fundamental em uma série de atividades metabólicas e fisiológicas nas plantas (BAO-SHAN *et al.*, 2004). Diversas fontes podem ser utilizadas como fonte de Si para as plantas, dentre estas se destaca aqueles aplicados aos solos em pó ou granulado, na forma de silicatos de Ca e de Mg, ou ainda na forma líquida, utilizados na aplicação foliar, como o silicato de K (KORNDÖRFER, SOUZA, 2018). No entanto, a absorção de Si da solução do solo ocorre preferencialmente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), sendo que sua concentração varia de 0,1 a 0,6 mmol L⁻¹ (EPSTEIN, 1999). A absorção ocorre por meio de proteínas de membranas específicas para o ácido monossilícico (KORNDÖRFER, SOUZA, 2018). De acordo com a capacidade de absorção e acúmulo de Si nos tecidos, as plantas podem ser classificadas em três grupos: plantas acumuladoras (100 a 150 g kg⁻¹ de Si), como por exemplo as gramíneas, intermediárias (10 a 50 g kg⁻¹ de Si), as abóboras, a soja por exemplo e não-acumuladoras como as solanáceas, por exemplo o tomate (concentrações abaixo de 5 g kg⁻¹ de Si) (MA *et al.*, 2001; FRANTZ, KHANDEKAR, LEISNER, 2011; PENNINGTON, 1991). Ou seja, a capacidade de absorção e acúmulo de Si na planta depende diretamente da espécie, além disso, esse pode ser um importante determinante do potencial de tolerância ao estresse (HODSON, SANGSTER, 1999). Em gramíneas o teor de Si no tecido das plantas pode ser em média de 10 a 20 vezes maiores do que nas dicotiledôneas (VAN RAIJ, 2011). Além disso, o Si é considerado

o único elemento que quando absorvido em excesso pelas plantas não acarreta prejuízos no seu desenvolvimento (CAMARGO, 2016). As plantas não acumuladoras de Si o absorvem-no mais lentamente que a água, propiciando o aumento de sua concentração na solução do solo, enquanto as plantas acumuladoras absorvem de forma passiva, sendo potencializada pelo fluxo em massa da água (LANA *et al.*, 2003; SANTOS *et al.*, 2021).

Muitos estudos apresentaram o Si como um próspero nutriente vegetal benéfico para estimular o crescimento e a produção de diferentes culturas (BAKHAT *et al.*, 2018; RIZWAN *et al.*, 2015; SHEHATA, ABDELGAWAD, 2019).

O Si tem se mostrado como uma tecnologia promissora na produção de plantas frente as constantes mudanças climáticas, o Si tem sido utilizado para superar os efeitos prejudiciais do estresse biótico e abiótico (BAKHAT *et al.*, 2018; SANTOS *et al.*, 2021).

3. SILÍCIO COMO MITIGADOR DE ESTRESSES ABIÓTICOS EM CUCURBITÁCEAS

3.1 METAIS PESADOS

O Si tem muitos efeitos benéficos, principalmente em plantas submetidas a diferentes tipos de estresse, como estresse salino, hídrico e por metais pesados, dentre outros (IWASAKI, MATSUMURA, 1999; ZHU *et al.*, 2014, 2015; LIU *et al.*, 2009; SALIM *et al.*, 2021). Entretanto, poucos são os trabalhos acerca do comportamento do Si frente a diferentes estresses em cucurbitáceas, principalmente em abóboras.

Um experimento foi conduzido por Iwasaki e Matsumura (1999) com o objetivo de observar o mecanismo de alívio induzido por Si da toxicidade de Mn em abóbora (*Cucurbita moschata* Duch cv. Shintosa), onde comparou-se o efeito do Si sobre a toxicidade do Mn na cultivar Shintosa com a da cultivar Super unryu. Neste experimento, foi constatado que plantas sem o fornecimento de Si, teve o crescimento afetado em ambas as cultivares sendo reduzido para menos de 80% quando a razão molar de Si/Mn na parte aérea foi inferior a 4,5. No entanto, quando utilizado silício nas doses

de 100 e 500 μM de Mn na solução nutritiva, foi notado o efeito aliviador do Si, onde plantas que foram tratadas com doses de silício obtiveram melhor resultado do crescimento. O efeito tornou-se mais pronunciado com o aumento dos níveis de Si na solução nutritiva. Mas, independentemente dos teores de Mn, a adição de Si não diminuiu o teor de Mn das plantas.

Em um segundo estudo desses mesmos pesquisadores, analisou-se o teor de Mn e Si nas folhas inferiores da cultivar Shintosa tratadas com diferentes níveis de Mn com e sem suprimento de Si. Constatou-se que nas doses de 100 e 250 μM de Mn, os teores de Mn na fração insolúvel aumentaram na presença de fornecimento de Si e o Mn solúvel representou menos de 9% do Mn total na folha. Além disso, mais de 84% do Si total foi encontrado na fração insolúvel em tampão em cada nível de Mn (IWASAKI, MATSUMURA, 1999). Como continuidade dos trabalhos anteriores, foi observado que tanto o Mn quanto o Si acumularam-se em altas concentrações ao redor da base dos tricomas na presença de suprimento de Si. Entretanto, plantas as quais não foram fornecidas com Si, foi detectado Mn ao redor de lesões necróticas marrons, além da base dos tricomas. Esses resultados sugerem que o Si aliviou a toxicidade do Mn por meio de um acúmulo localizado de Mn com Si em uma forma metabolicamente inativa ao redor da base dos tricomas na superfície da folha (IWASAKI, MATSUMURA, 1999).

Silício fornecido como silicato de sódio (1-8 mM) diminuiu os sintomas de toxicidade de Mn em *Cucumis sativus* L. (cv. Chinesische Schlange) cultivado em solução nutritiva com concentrações baixas a elevadas de Mn (0,5-1000 μM). Apesar de observar-se aproximadamente o mesmo teor de Mn total nas folhas, plantas não tratadas com Si apresentaram maiores concentrações de Mn no fluido de lavagem intercelular em comparação com plantas tratadas com Si. (ROGALLA, RÖMHELD, 2002).

A concentração de Mn no fluido de lavagem intercelular correlacionou-se positivamente com a gravidade dos sintomas de toxicidade por Mn e negativamente com o suprimento de Si. Além disso, nas plantas tratadas com Si, apresentava menor teor de Mn estava localizado no simplasto (< 10%) e maior teor de Mn estava ligado

à parede celular (> 90%) em comparação com plantas não tratadas com Si (cerca de 50% em cada compartimento) (ROGALLA, RÖMHELD, 2002).

O manganês presente nas plantas tratadas com Si é, portanto, menos disponível e, por isso, menos tóxico do que nas plantas não tratadas com Si. Concluindo-se, portanto, que a tolerância de Mn mediada por Si em *C. sativus* é consequência de uma ligação mais forte de Mn às paredes celulares e uma diminuição da concentração de Mn dentro do simplasto. Esses resultados suportam o papel do Si como um importante elemento benéfico na nutrição das plantas (ROGALLA; RÖMHELD, 2002).

Alguns estudos demonstram que sob algumas condições o Si diminui também o efeito da toxicidade por Al (FREITAS *et al.*, 2015). Pesquisas apontam a interação entre Al e Si que ocorre no interior das plantas, por meio do estímulo do sistema antioxidante, ocorrendo a complexação dos íons metálicos, imobilização durante o crescimento da espécie vegetal ou compartimentalização no vacúolo e citoplasma (NEUMAN, NIEDEN, 2001). Outra possibilidade é a ocorrência de formação do complexo entre Al e Si externamente à planta, amenizando a toxidez por Al (SOUSA JUNIOR, 2019). Em pH próximo a neutralidade o Si têm a capacidade de formar com o Al hidroxialuminossilicatos, que reduzem os efeitos deletérios da toxicidade (HODSON, SANGSTER, 1999; SANTOS *et al.*, 2021).

3.2 SALINIDADE

A salinidade é responsável por provocar um dos estresses abióticos mais eminentes em regiões áridas e semiáridas, provocando perdas elevadas nas produções dessas regiões (PARIDA, DAS, 2004).

A salinidade prejudica inúmeras funções, sejam elas funções metabólicas e fisiológicas nas plantas, como absorção de água, homeostase iônica, respiração, equilíbrio osmótico e síntese de proteínas e ácidos nucleicos (SIDDIQUI *et al.*, 2012).

Em ambientes salinos, o Si exerce impactos positivos sobre as culturas. Esses benefícios são geralmente associados à habilidade do Si em prevenir danos causados

pela oxidação, ampliando a atividade de enzimas antioxidantes. Além disso, a adubação com silicato contribui para reduzir desequilíbrios nutricionais quando as plantas enfrentam condições de salinidade (SANTOS *et al.*, 2021).

Em abobrinha cultivada hidroponicamente, o fornecimento de 1 mM de Si via solução nutritiva foi capaz de mitigar os efeitos deletérios da salinidade por NaCl e influenciar de forma positiva tanto no crescimento vegetativo quanto na produção de frutos (SAVVAS *et al.*, 2009).

Em alta salinidade, o silício aumentou a massa fresca e seca de todas as partes de plantas de abobrinha, especificamente raízes, parte aérea e frutos, o que implica um efeito positivo na fotossíntese da planta inteira. As medições das trocas gasosas revelaram que o aumento induzido pelo Si da biomassa total da planta sob condições de estresse salino foi devido ao aumento das taxas líquidas de assimilação de CO₂ (SAVVAS *et al.*, 2009).

A salinidade pode restringir a assimilação líquida devido à redução do suprimento de CO₂ decorrente de um fechamento parcial da abertura dos estômatos ou ao prejudicar o mecanismo bioquímico de fixação de CO₂, independentemente das taxas de difusão de CO₂ alteradas ou por ambos os procedimentos (GREENWAY, MUNNS, 1980; SEEMANN, CRITCHLEY, 1985).

O Si também aumenta a tolerância do pepino ao estresse salino, esse comportamento foi observado em folhas de pepino (*Cucumis sativus*) sob estresse salino. Onde quatro tratamentos com três repetições foram investigados consistindo de um controle (nutrientes basais sem adição de NaCl ou Si), 1,0 mM de Si, 50 mM de NaCl e 50 mM de NaCl com 1,0 mM de Si. Por meio deste estudo foi observado que a adição de Si diminuiu significativamente porcentagem de vazamento eletrolítico e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e teor de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico, e melhorou significativamente as atividades de superóxido dismutase (SOD), guaiacol peroxidase (GPX), ascorbato peroxidase (APX), dehidroascorbato redutase (DHAR) e glutatona redutase (GR) em folhas estressadas por sal de ambas as cultivares (ZHU *et al.*, 2015). Pode-se concluir que atividades mais altas de SOD, GPX, APX, DHAR e GR em folhas estressadas por sal, a adição de Si pode induzir resposta frente ao

estresse salino e proteger os tecidos da planta do dano oxidativo da membrana sob estresse salino, mitigando assim a toxicidade do sal e melhorando o crescimento de plantas de pepino.

3.3 DEFICIÊNCIA HÍDRICA

A seca é um dos principais estresses abióticos e o fator mais considerável que limita o crescimento e a produtividade das plantas, especialmente em ambientes áridos (SAKRAN *et al.*, 2022). Ela influencia destrutivamente as características anatômicas, fisiológicas e morfológicas das culturas agrícolas (MANSOUR *et al.*, 2021). Os impactos causados pelo estresse hídrico no desempenho de diferentes culturas de campo têm sido amplamente investigados, bem como o uso do silício como mitigador de estresse hídrico em plantas (ABDOU *et al.*, 2021; AZAB *et al.*, 2022; MANNAN *et al.*, 2022).

No estudo de Azab *et al.* (2022) objetivando investigar a influência de três concentrações de silicato de potássio; 10, 15 e 20 g/L em plantas de abóbora sob três regimes de irrigação; 100, 75 e 50% da evapotranspiração (ET) estimada da cultura, foi observado que plantas de abóbora em condições de estresse hídrico moderado (75% ET) ou severo (50% ET) diminuíram gradualmente pigmentos fotossintéticos, conteúdo relativo de água (RWC), conteúdo mineral, parâmetros fisiológicos e características anatômicas das plantas. Entretanto, plantas tratadas com silicato de potássio mesmo em condições de estresse aumentaram substancialmente os pigmentos fotossintéticos, o conteúdo de RWC, N, P e K, as atividades das enzimas antioxidantes e os caracteres anatômicos (espessura da periderme, espessura do córtex, espessura da nervura central, espessura do mesofilo, número de vasos do xilema por feixe vascular, espessura do feixe vascular, espessura do tecido colênquimático e epiderme superior e espessura do tecido colênquimático e epiderme inferior) refletindo assim, na melhoria de todos os parâmetros de crescimento e rendimento (AZAB *et al.*, 2022). Diante desses resultados, é comprovado que o Si tem um papel decisivo na mitigação do estresse hídrico por meio de diferentes

mecanismos, como aumento da síntese de fitohormônios, absorção de nutrientes minerais, ajuste osmótico, regulação de solutos compatíveis, modificação dos atributos de troca gasosa e redução do estresse oxidativo (RIZWAN *et al.*, 2015). Além disso, o Si é um elemento benéfico para vários processos metabólicos, pois suprime a degradação da clorofila ou melhora o aparato fotossintético, promovendo o conteúdo de clorofila e o equilíbrio hídrico (RUBINOWSKA *et al.*, 2014).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do silício na agricultura traz benefícios tanto para o solo quanto para as plantas. No solo, a aplicação do Si pode promover melhorias nas propriedades químicas deste. Além disso, o uso desse mineral pode proporcionar a maior disponibilidade de outros nutrientes que são utilizados pelas plantas, acarretando desta forma, no uso mais eficiente destes minerais utilizados no processo de adubação na agricultura e conseqüentemente menos custo para a produção. Além disso, o uso do silício tem se mostrado eficiente como agente mitigador nos diferentes tipos de estresses, seja estresse salino, hídrico, por metais pesados, dentre outros. Diante desse panorama é imprescindível a execução de estudos acerca dos mecanismos de ação do Si em diferentes culturas frente aos diversos tipos de estresses, principalmente cucurbitáceas devido à escassez de informações na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOU, N. M.; ABDEL-RAZEK, M. A.; ABD EL-MAGEED, S. A.; SEMIDA, W. M.; LEILAH, A. A. A.; ABD EL-MAGEED, T. A.; ALI, E. F.; MAJRASHI, A.; RADY, M. O. A. High Nitrogen Fertilization Modulates Morpho-Physiological Responses, Yield, and Water Productivity of Lowland Rice under Deficit Irrigation. **Agronomy**, v. 11, n. 7, p. 1291, jul. 2021.

ALCARDE, José Carlos e RODELLA, Arnaldo Antonio. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. Tópicos em Ciência do Solo. Tradução . Viçosa: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2003. v. 3. p. 291-334.

AZAB, E. S.; ALSHALLASH, K. S.; ALQAHTANI, M. M.; SAFHI, F. A.; ALSHAMRANI, S. M.; ALI, M. A. M.; EL-MAGEED, T. A. A.; EL-TAHER, A. M. Physiological, Anatomical, and Agronomic Responses of Cucurbita pepo to Exogenously Sprayed Potassium Silicate at Different Concentrations under Varying Water Regimes. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 2155, set. 2022.

BAO-SHAN, L.; SHAO-QI, D.; CHUN-HUI, Li.; LI-JUN, F.; SHU-CHUN, Q.; MIN, Y. Effect of TMS (nanostructured silicon dioxide) on growth of Changbai larch seedlings. **Journal of Forestry Research**, v. 15, n. 2, p. 138–140, 1 jun. 2004.

BAKHAT, H. F.; BIBI, N.; ZIA, Z.; ABBAS, S.; HAMMAD, H. M.; FAHAD, S.; ASHRAF, M. R.; SHAH, G. M.; RABBANI, F.; SAEED, S.. Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: A review. **Crop Protection**, v. 104, p. 21–34, 1 fev. 2018.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERIA, N. K.; DATNOFF, L. E.; SILVA, O. F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 325–330, jun. 2001.

CAMARGO, M. Efeito do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **Informações Agrônomicas**, v. 153, p. 2016, 3 set. 2016.

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. 195–196, p. 234–242, mar. 2013.

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

FREITAS, L. B.; FERNANDES, D. M.; MAIA, S. C. M. Silício na nutrição mineral e acúmulo de alumínio em plantas de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, p. 440–448, dez. 2015.

GREENWAY, H.; MUNNS, R. Mechanisms of Salt Tolerance in Nonhalophytes. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 31, p. 149–190, 1 jun. 1980.

HODSON, M. J. & SANGSTER, A. G (1999). **Aluminium/silicon interactions in conifers. Journal of inorganic biochemistry**, 76, 89-98.

IWASAKI, K.; MATSUMURA, A. Effect of silicon on alleviation of manganese toxicity in pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch cv. Shintosa). **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 45, n. 4, p. 909–920, dez. 1999.

KORNDÖRFER, G. & SOUZA, S. R. Elementos benéficos. In: FERNANDES, Manlio Silvestre; SOUZA, Sônia Regina de; SANTOS, Leandro Azevedo (2018). Nutrição Mineral de Plantas, cap. 15, p. 563-599.

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

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Agronômica Ceres, 2006. 638p

MALIK, M. A.; WANI, A. H.; MIR, S. H.; REHMAN, I. Ul.; TAHIR, I.; AHMAD, P.; RASHID, I. Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 165, p. 187–195, 1 ago. 2021.

MANSOUR, E.; DESOKY, E. S. M.; ALI, M. M. A.; ABDUL-HAMID, M. I.; ULLAH, H.; ATTIA, A.; DATTA, A. Identifying drought-tolerant genotypes of faba bean and their agro-physiological responses to different water regimes in an arid Mediterranean environment. **Agricultural Water Management**, v. 247, p. 106754, 31 mar. 2021.

MANNAN, M. A.; TITHI, M. A.; ISLAM, M. R.; AL MAMUN, M. A.; MIA, S.; RAHMAN, M. Z; AWAD, M. F.; ELSAYED, A. I.; MANSOUR, E.; HOSSAIN, M. S. Soil and foliar applications of zinc sulfate and iron sulfate alleviate the destructive impacts of drought stress in wheat. **Cereal Research Communications**, v. 50, n. 4, p. 1279–1289, 1 dez. 2022.

MENEGALE, M. L. C.; CASTRO, G. S. A.; MANCUSO, M. A. C. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Science**, Umuarama, v. 4, n. Especial, p. 435-454, 2015.

NEUMANN, D.; ZUR NIEDEN, U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. **Phytochemistry**, v. 56, n. 7, p. 685–692, abr. 2001.

PARIDA, A. K.; DAS, A. B. Effects of NaCl stress on nitrogen and phosphorous metabolism in a true mangrove *Bruguiera parviflora* grown under hydroponic culture. **Journal of Plant Physiology**, v. 161, n. 8, p. 921–928, ago. 2004.

PENNINGTON, J. A. T. Silicon in foods and diets. **Food Additives & Contaminants**, v. 8, n. 1, p. 97–118, 1 jan. 1991.

PEREIRA, H. S.; VITTI, G. C.; KORNDORFER, G. H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 101–108, fev. 2003.

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

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de

lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 5, p. 849–857, out. 2006.

REIS JÚNIOR, J. D. dos; ALOVISI, A. M. T.; FERREIRA, J. a. A.; ALOVISI, A. A.; GOMES, C. F. Attributes of chemical soil and production of sugar cane in response to calcium silicate. **Revista de Ciências Agrárias (Portugal)**, v. 36, n. 1, p. 3–9, 2013.

RIZWAN, M.; ALI, S.; IBRAHIM, M.; FARID, M.; ADREES, M.; BHARWANA, S. A.; ZIA-UR-REHMAN, M.; QAYYUM, M. F.; ABBAS, F. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of drought and salt stress in plants: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 20, p. 15416–15431, 1 out. 2015.

ROGALLA, H.; RÖMHELD, V. Role of leaf apoplast in silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L. **Plant, Cell & Environment**, v. 25, n. 4, p. 549–555, abr. 2002.

RUBINOWSKA, K.; POGROSZEWSKA, E.; LASKOWSKA, H.; SZOT, P.; ZDYBEL, A. M.; STASIAK, D.; KOZAK, D. The subsequent effect of silicon on physiological and biochemical parameters of *Polygonatum multiflorum* (L.) All. “Variegatum” cut shoots. **Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus**, v. 13, p. 167–178, 1 jan. 2014.

SAKRAN, R. M.; GHAZY, M. I.; REHAN, M.; ALSOHIM, A. S.; MANSOUR, E. Molecular Genetic Diversity and Combining Ability for Some Physiological and Agronomic Traits in Rice under Well-Watered and Water-Deficit Conditions. **Plants**, v. 11, n. 5, p. 702, jan. 2022.

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 . The role of silicon in plants. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, p. e3810716247, 2021.

SAVVAS, D.; GIOTIS, D.; CHATZIEUSTRATIOU, E.; BAKEA, M.; PATAKIOUTAS, G. Silicon supply in soilless cultivations of zucchini alleviates stress induced by salinity and powdery mildew infections. **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 1, p. 11–17, jan. 2009.

SEEMANN, J. R.; CRITCHLEY, C. Effects of salt stress on the growth, ion content, stomatal behaviour and photosynthetic capacity of a salt-sensitive species, *Phaseolus vulgaris* L. **Planta**, v. 164, n. 2, p. 151–162, 1 maio 1985.

SIDDIQUI, M. H.; AL-WHAIBI, M. H.; SAKRAN, A. M.; BASALAH, M. O.; ALI, H. M. Effect of Calcium and Potassium on Antioxidant System of *Vicia faba* L. Under Cadmium Stress. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 13, n. 6, p. 6604–6619, jun. 2012.

SHEHATA, M. N.; ABDELGAWAD, K. F. Potassium Silicate and Amino Acids Improve Growth, Flowering and Productivity of Summer Squash under High Temperature Condition. **Environmental Science**, 2019.

STRUYF, E.; SMIS, A.; VAN DAMME, S.; GARNIER, J.; GOVERS, G.; VAN WESEMAEL, B.; CONLEY, D. J.; BATELAAN, O.; FROT, E.; CLYMANS, W.; VANDEVENNE, F.; LANCELOT, C.; GOOS, P.; MEIRE, P. Historical land use change has lowered terrestrial silica mobilization. **Nature Communications**, v. 1, n. 1, p. 129, 30 nov. 2010.

VAN RAIJ, B (2011). **Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, p. 420.

ZHU, Y.; GONG, H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 455–472, 1 abr. 2014.

ZHU, Y. X.; XU, X. B.; HU, Y. H.; HAN, W. H.; YIN, J. L.; LI, H. L.; GONG, H. J. Silicon improves salt tolerance by increasing root water uptake in *Cucumis sativus* L. **Plant Cell Reports**, v. 34, n. 9, p. 1629–1646, 1 set. 2015.