



**SILÍCIO COMO MITIGADOR DO ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA HÍDRICA NA CULTURA DO MILHO**  
**SILICON AS A STRESS MITIGATOR FOR WATER DEFICIENCY IN MAIZE CULTIVATION**

GRAÇA, Genilza Almeida da<sup>1</sup>

## RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura globalmente consumida e produzida. No entanto, as mudanças climáticas podem prejudicar sua produtividade devido à redução de chuvas, levando a secas. O silício (Si), embora não essencial, demonstrou benefícios notáveis para plantas, especialmente na redução do estresse hídrico. Esta revisão foca nas mudanças que o Si induz no milho sob condições de deficiência hídrica. O milho acumula Si, e sua aplicação melhora a absorção de nutrientes como nitrogênio, potássio, cobre e cálcio, favorecendo o sistema radicular e reduzindo carências nutricionais. Também aumenta a acumulação de osmolitos e a atividade antioxidante de enzimas, reduzindo danos celulares. Isso preserva a clorofila e a eficiência fotossintética. Além disso, o Si modula positivamente a fotossíntese, reduzindo a perda de água ao diminuir a condutância estomática e a transpiração, o que contribui para um maior teor de água nas plantas. Essas adaptações benéficas resultam em maior crescimento e produtividade do milho sob deficiência hídrica. Portanto, o Si aprimora a tolerância à seca nas plantas de milho, especialmente em um contexto de mudanças climáticas. Futuras pesquisas devem fornecer diretrizes aprimoradas para o uso de Si no cultivo de milho, considerando variedades e condições ambientais.

**Palavras-chave:** Absorção de nutrientes. Aumento da produtividade. Metabolismo antioxidante. Osmorreguladores. Trocas gasosas.

## ABSTRACT

Corn (*Zea mays* L.) is a globally consumed and produced crop. However, climate change could harm its productivity due to reduced rainfall, leading to droughts. Silicon (Si), although not essential, has demonstrated notable benefits for plants, especially in reducing water stress. This review focuses on the changes that Si induces in maize under water deficit conditions. Corn accumulates Si, and its application improves the absorption of nutrients such as nitrogen, potassium, copper and calcium, favoring the root system and reducing nutritional deficiencies. It also increases the accumulation of osmolytes and the antioxidant activity of enzymes, reducing cell damage. This preserves chlorophyll and photosynthetic efficiency.

<sup>1</sup> Bacharelado do curso de Engenharia Agrônômica, pela Universidade Federal de Sergipe e Pós-graduação do curso de Agronegócio, pela FaSouza, Mestre em Ciências, pela Universidade Federal de Sergipe. Email [almeidagenilza@hotmail.com](mailto:almeidagenilza@hotmail.com)

Furthermore, Si positively modulates photosynthesis, reducing water loss by decreasing stomatal conductance and transpiration, which contributes to a higher water content in plants. These beneficial adaptations result in greater growth and productivity of corn under water stress. Therefore, Si enhances drought tolerance in maize plants, especially in the context of climate change. Future research should provide improved guidelines for the use of Si in corn cultivation, considering varieties and environmental conditions.

**Keywords:** Nutrient absorption. Increased productivity. Antioxidant metabolism. Osmoregulators. Gas exchanges.

## 1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas de maior consumo e produção em todo planeta, devido a sua vasta aplicabilidade em diversas áreas, como alimentação humana e animal, até a indústria de alta tecnologia. Sabe-se que as mudanças climáticas irão impactar gravemente sua produtividade. Acredita-se que as mudanças climáticas irão afetar adversamente as práticas agrícolas, dentre outros fatores, através de alterações dos índices pluviométricos, que pode provocar cenários de seca. O estresse por deficiência hídrica é o principal fator ambiental que afeta o desenvolvimento vegetal. As plantas absorvem água com o objetivo de manterem a hidratação e em uma condição de perda constante de água por transpiração, junto com a evaporação, a água disponível no solo pode diminuir drasticamente, sendo que, sob baixos níveis de umidade no solo, ocorrem alterações deletérias na integridade da membrana celular, absorção de nutrientes, conteúdo de clorofila, relações hídricas e atividade fotossintética em diversas culturas.

As plantas possuem complexas adaptações fisiológicas e bioquímicas para ajuste e adaptação a uma variedade de pressões ambientais. O silício (Si), apesar de não ser considerado um elemento mineral essencial para a maioria das plantas, tem sido uma alternativa para intensificar mecanismos adaptativos e diminuir os efeitos deletérios causados pelo estresse por deficiência hídrica. Com isso, o Si pode ser utilizado para melhorar a tolerância de plantas de milho à seca. O mineral

pode proporcionar aumento na absorção de nutrientes, atividade enzimática antioxidante, ajustamento osmótico e fotossíntese, além do seu efeito no *status* hídrico da planta, como diminuição das taxas transpiratórias, contribuindo para um maior teor de água na planta.

Desta maneira, devido a importância da cultura do milho, junto ao cenário futuro de baixos índices pluviométricos e as contribuições do Si como mitigador do estresse por deficiência hídrica, esta revisão abordará o efeito do Si na cultura do milho sob deficiência hídrica, com o enfoque em processos bioquímicos e fisiológicos, junto as suas implicações.

## 2. SILÍCIO, UM ELEMENTO MINERAL BENÉFICO

O Si é o segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre e considerado um mineral benéfico para o desenvolvimento de muitas espécies vegetais (ZHANG et al., 2013). Apesar de não considerado um elemento essencial para a maioria das plantas, é conhecido por ser um mitigador do estresse biótico e abiótico e trazer ganhos de produtividade sob condições ótimas e estressantes (FREW et al., 2018). No solo, o Si existe de forma predominantemente como sílica ( $\text{SiO}_2$ ), que as plantas não podem absorver (RANJAN et al., 2021). A absorção do elemento ocorre de forma passiva e junto a absorção da água, na forma de ácido monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) (SANTI; NURHAIMI; MULYANTO; 2018). Apesar da importância do Si para muitas culturas agrícolas, a disponibilidade do elemento mineral no solo é baixa (HATTORI et al., 2005), sugerindo a necessidade de uma contribuição por meio de fertilização (OLIVEIRA et al., 2019).

Por apresentar propriedades não corrosivas e também ser livre de poluição, sua fertilização é de alta qualidade para desenvolvimento de uma agricultura ecologicamente sustentável (WANG, 2016). A fertilização com Si pode ser feita via solo ou foliar (ARTYSZAK; GOZDOWSKI; KUCINSKA, 2019). A forma líquida de Si é mais fácil de aplicar em comparação com a sólida, onde a aplicação foliar de Si é preferível, sendo bastante utilizadas nas formas de silicato de potássio e silicato de

sódio (BHARDWAJ; KAPOOR, 2021).

A distribuição de Si na planta ocorre em função do fluxo transpiratório, sendo depositado nas zonas de maior transpiração (GAO et al., 2006). Seu teor nas plantas varia entre 0,1 e 10% (RAO; SUSHMITHA, 2017). De acordo com Mitani-Ueno e Ma (2020), as plantas podem ser geralmente divididas em três grupos com base em seu teor de Si por massa seca: não acumuladoras (teor de Si por massa seca <0,5%); acumuladoras intermediárias (teor de Si por massa seca de 0,5% a 1%) e acumuladoras (teor de Si por massa seca >1%). Além das espécies da família Cyperaceae, espécies da família Poaceae, como o milho, acumulam altos níveis de Si, trazendo uma série de benefícios (PUPPE; SOMMER, 2018), enquanto a maioria das plantas, principalmente dicotiledôneas, são incapazes de acumular altos níveis do mineral, onde a diferença na acumulação entre as espécies tem sido atribuída a diferenças na capacidade de absorção do mineral pelas raízes (MA, YAMAJI, 2006).

Devido aos efeitos das mudanças climáticas no agravamento de situações de estresse para as plantas, o Si vem sendo um importante mitigador, principalmente para a deficiência hídrica para diferentes espécies vegetais (EL-MAGEED et al., 2021).

Pode-se afirmar que o papel do Si nas plantas não se restringe à formação de uma barreira física ou mecânica nas paredes celulares, lúmens e vazios intercelulares, o elemento mineral modula o metabolismo vegetal e altera diversas atividades bioquímicas e fisiológicas, principalmente em plantas submetidas a condições de estresse (ISA et al., 2010). Os efeitos benéficos do Si têm sido associados a maior absorção de nutrientes, osmorregulação, atividade antioxidante e melhorias nas trocas gasosas (PANG et al., 2017). Com isso, vem sendo utilizado como um importante mitigador da deficiência hídrica na cultura do milho (EL-MAGEED et al., 2021).

### 3. ABSORÇÃO DE NUTRIENTES

As plantas requerem quantidades suficientes de nutrientes minerais

essenciais para seu crescimento e desenvolvimento adequados (TAIZ et al., 2017). A deficiência hídrica não só interrompe, como também inibe a absorção de nutrientes pelas raízes, bem como transporte para a parte aérea, ou seja, diminui o fornecimento de nutrientes, conseqüentemente, afeta o crescimento e desenvolvimento vegetal (RATNAKUMAR et al., 2016). Foi demonstrado que o uso de Si pode desempenhar um papel fundamental na estabilização da absorção, transporte e distribuição de diferentes nutrientes minerais em plantas sob estresse hídrico ajudando as plantas na mitigação do estresse hídrico (MALIK et al., 2021).

Sob deficiência hídrica, a aplicação de Si melhorou os teores de nitrogênio (N), potássio (K), cobre (Cu) e Si em plantas de milho (AQAEI et al., 2020). Quando o solo enfrenta um período prolongado de seca, a mobilidade do N é severamente restringida pelo solo desidratado (DING et al., 2018). Sabe-se que N é constituinte de aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleotídeo e clorofilas (NÄSHOLM; KIELLAND GANETEG, 2009). Enquanto K está envolvido em muitos processos fisiológicos, como ativação enzimática, síntese de proteínas, fotossíntese, osmorregulação, extensão celular, além do mecanismo de abertura e fechamento estomático (AHMAD et al., 2018). O Cu está envolvido como elemento em proteínas reguladoras e como cofator de muitas enzimas, como a superóxido dismutase (SILVA et al., 2010), importante enzima antioxidante, que será abordada posteriormente. Ademais, fora a sua atuação como mecanismo de resposta ao estresse oxidativo, Cu também participa do transporte de elétrons na fotossíntese, regula a respiração celular, bem como atua no metabolismo da parede celular, transcrição de proteínas, translocação e sinalização hormonal (CLEMENS, 2001). Juntamente, Kaya, Tuna e Higgs (2006) relataram que a aplicação de Si em plantas de milho sob deficiência hídrica melhorou a absorção de cálcio (Ca), onde salienta-se que o nutriente atua na estabilidade e permeabilidade da membrana, o que pode ter conferido certa proteção a membrana celular.

Uma melhor absorção de nutrientes pode mitigar uma série de efeitos deletérios associados a deficiência hídrica, visto que, com uma diminuição de sua absorção, pode haver deficiência nutricional e ocorrer aspectos bioquímicos e

fisiológicos danosos, como agravamento de estresse oxidativo, danos a membrana celular e as clorofilas, junto a diminuição das taxas fotossintéticas (SILVA et al., 2010). A melhoria na absorção de nutrientes através da aplicação de Si é associada ao aumento do sistema radicular e condutância hidráulica radicular, que ocorre através de alterações benéficas nas relações hídricas, como aumento nas concentrações de osmólitos (MALIK et al., 2021). Inclusive, um melhor desenvolvimento do sistema radicular é relatado em plantas de milho tratadas com Si (PARVEEN et al., 2019), junto ao aumento das concentrações de osmólitos (XU; GUO; LIU et al., 2022).

#### 4. CONTEÚDO DE OSMÓLITOS

Para superar os impactos prejudiciais relacionados ao estresse por deficiência hídrica, as plantas desenvolveram o mecanismo de ajuste osmótico, por meio do aumento da síntese de osmólitos, que constituem prolina, glicina-betaína, açúcares e proteínas solúveis, entre outros (DEDEMO et al., 2013). Além de atuarem na manutenção do equilíbrio hídrico, também agem no processo de manutenção da integridade de membranas celulares, visto que, atuam na diminuição dos níveis de oxidação de lipídios por meio da proteção do potencial redox da célula e na eliminação de radicais livres, além de também atuarem na integridade de enzimas e proteínas (DAWOOD, 2016; SHINDE et al., 2016; JOSEPH; RADHAKRISHNAN; MOHANAN, 2015).

Sabe-se que o mecanismo de tolerância ao estresse hídrico nas plantas é específico da espécie (HABIB et al., 2020). É relatado que plantas de milho sob deficiência hídrica podem aumentar suas concentrações de osmólitos (GHASEMI et al., 2022). O aumento dos teores de osmoprotetores pode ser mediado pelo Si através da indução da expressão de genes relacionados a osmorregulação (MALIK et al., 2021). No entanto, o condicionamento fisiológico de sementes de milho com Si diminuiu a concentração de osmólitos, como prolina, açúcares solúveis e glicina-betaína sob estresse por deficiência hídrica (PARVEEN et al., 2019).

Diferentemente, o tratamento com Si em plantas de milho influenciou no aumento de prolina e glicina-betaína (MALIK et al., 2021), açúcares solúveis (SIRISUNTORNLAK et al., 2021) e proteínas solúveis (XU; GUO; LIU et al., 2022).

Vale ressaltar que as respostas diferem entre tecidos analisados, duração e intensidade do estresse (SANTOS; LIMA; MORGADO, 2010). Pode ser um indicativo que as plantas tratadas com Si ao diminuírem os teores de osmólitos poderiam estar menos estressadas, visto que, um maior acúmulo de osmólitos pode também ser um sintoma de lesão por estresse (PEI et al., 2017).

## 5. PROTEÇÃO CONTRA O ESTRESSE OXIDATIVO

Sob baixas concentrações, as espécies reativas de oxigênio (EROs) possuem algumas funções de grande importância no metabolismo vegetal, a exemplo da sinalização celular. Todavia, sob estresse, como o caso de baixos níveis de disponibilidade hídrica, acontece um aumento exacerbado das concentrações de EROs, como radical a superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ), radical hidroperoxila ( $HO_2^{\cdot}$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e radical hidroxila ( $OH^{\cdot}$ ) (SHARMA et al. 2012; MARTINS et al., 2018). As EROs são formas parcialmente reduzidas de oxigênio atmosférico, produzidos em processos vitais, como no caso da fotossíntese, respiração e fotorrespiração (BARBOSA et al., 2014).

O aumento das concentrações de EROs pode ser causado por inúmeros fatores, como o estresse hídrico, em que membrana das células vegetais está sujeita a danos bem pronunciados, que desencadeiam a peroxidação lipídica. Danos a ácidos graxos da membrana celular podem produzir pequenos fragmentos de hidrocarbonetos, como o Malondialdeído (MDA) (MOUSSA; ABDEL-AZIZ, 2008; AMIRJANI, 2012). O MDA é caracterizado como o produto final da peroxidação lipídica da membrana celular e é um sinal importante de lesão do sistema de membrana (MIRZAEI; MOIENI; GHANATI, 2013). Juntamente, o nível de lesão na membrana celular ocasionado pelo estresse por deficiência hídrica pode ser estimado por meio de análise do extravasamento de eletrólitos (BAIJI; KINET;

LUTTS, 2001). Um maior extravasamento de eletrólitos pode ser atribuído ao estresse por deficiência hídrica, devido à ruptura da integridade da membrana celular, que pode ocorrer através da produção de EROs (MARTINS et al., 2018).

Plantas de milho sob deficiência hídrica tratadas com Si diminuíram o conteúdo de MDA,  $H_2O_2$ ,  $O_2^{\cdot-}$  (LI, MA, SHANG, 2007; PARVEEN et al., 2019; NING et al., 2020) e extravasamento de eletrólitos (KAYA; TUNA; HIGGS, 2006), indicativo de melhorias na capacidade de eliminação de EROs por ação do Si (KIM et al., 2017). O elemento mineral pode atuar na expressão de genes relacionados a enzimas antioxidantes (RANJAN et al., 2021). Sabe-se que para diminuir os efeitos deletérios causados pelas EROs, as plantas desenvolveram um forte sistema antioxidante, que se inicia com atuação enzimática (BARBOSA et al., 2014). A enzima antioxidante superóxido dismutase (SOD) é a primeira que age sobre os efeitos tóxicos causados pelas EROs, a referida enzima é presente na maioria dos locais celulares, atuando na eliminação do radical  $O_2^{\cdot-}$  por meio de sua dismutação em  $O_2$  e  $H_2O_2$  (SANTOS et al., 2015). Em seguida, o  $H_2O_2$  é dismutado em  $H_2O$  e  $O_2$ , pela ação da enzima catalase (CAT), especialmente nos peroxissomos (DEDEMO et al., 2013). A enzima ascorbato peroxidase (APX) possui a mesma função da enzima CAT, contudo detém uma maior afinidade pelo ácido ascorbato como agente redutor agindo em local distinto, nos cloroplastos e citosol (SANTOS; SILVA, 2015). A peroxidase (POD) se localiza principalmente na parede celular e vacúolos e usa o  $H_2O_2$  como oxidante e compostos de natureza fenólica como doadores de elétrons. Desta maneira, o  $H_2O_2$  formado pela ação da SOD também pode ser eliminado pela POD, além da CAT e APX (BARBOSA et al., 2014). A suplementação com Si aumentou a atividade das enzimas antioxidantes SOD, CAT e POD em plantas de milho estressadas por deficiência hídrica (PARVEEN et al., 2019; NING et al., 2020), o que pode refletir uma melhor proteção da membrana celular e menor conteúdo de espécies reativas de oxigênio, contudo não foi proporcionado aumento da atividade da APX (PARVEEN et al., 2019; MERHIJ et al., 2019), já Xu, Guo e Liu (2022) observaram aumento na atividade antioxidante da APX.

Por meio das alterações benéficas no sistema antioxidante citadas anteriormente mediadas pela aplicação pelo Si, tem sido relatada a proteção do conteúdo de clorofila em plantas de milho sob deficiência hídrica (TEIXEIRA et al., 2022), visto que, a diminuição das concentrações de pigmentos fotossintéticos sob deficiência hídrica pode ser considerada um sintoma típico de estresse oxidativo ocasionado pelo processo de fotooxidação e degradação dos pigmentos (FAROOQ et al., 2009). Tem sido relatado que o Si também pode promover a biossíntese de clorofila (HUSSAIN et al., 2021), que já foi observado na cultura do milho em deficiência hídrica (XU; GUO; LIU, 2022).

A deficiência hídrica pode ocasionar fotoinibição devido ao aumento da produção de EROs, causando danos as membranas dos tilacóides, conseqüentemente diminuindo a eficiência fotossintética (CINTRA et al., 2020). Parâmetros de fluorescência da clorofila podem refletir a integridade ou o dano fotoinibitório nos centros de reação do PSII (REIS et al., 2020), sendo muito empregados para tais avaliações, os parâmetros de atividade fotoquímica, como eficiência potencial ( $F_v/F_m$ ) e efetiva ( $\Phi_{PSII}$ ) do fotossistema II (PSII) (FORDOEI; BIDGHOLI, 2016). A razão  $F_v/F_m$  é utilizada para estimar a eficiência quântica máxima do PSII (BAKER; ROSENQVST, 2004). De forma igual,  $\Phi_{PSII}$  avalia a atividade fotoquímica, indicando a fração absorvida pela clorofila associada ao PSII usada na atividade na fotoquímica, assim, analisa a quantidade de elétrons transportados (LICHTENTHALER et al., 2005; AZEVEDO NETO et al., 2011). Plantas de milho sob deficiência hídrica tratadas com Si aumentaram os parâmetros de  $F_v/F_m$  e  $\Phi_{PSII}$  (XU; GUO; LIU et al., 2022), o que pode refletir em maiores taxas fotossintéticas (BAKER, 2008).

## 6. TROCAS GASOSAS

Entre as análises ecofisiológicas de trocas gasosas, estão as taxas fotossintéticas, condutância estomática, transpiração e eficiência no uso da água (LONG; BERNACCHI, 2003). A fotossíntese está entre os fenômenos mais

importantes para as plantas, sendo responsável pelo seu crescimento e desenvolvimento (RASTOGI et al., 2021). O processo é sensível a restrição hídrica, devido seus efeitos negativos na maquinaria fotossintética e sua funcionalidade (ASMAR et al., 2013).

A baixa disponibilidade hídrica pode provocar uma menor condutância estomática (POIRIER-POCOVI; BAILEY, 2020). A análise é uma medida da abertura estomática, que traz resultados das trocas gasosas entre as plantas e o meio (CO<sub>2</sub> e vapor d'água) (TAIZ et al., 2017). Um aumento dos níveis de Si pode reduzir a condutância estomática e conseqüentemente a transpiração, devido a sua deposição nas paredes epidérmicas das folhas e estômatos (MELO et al., 2003; BUKHARI et al., 2021), alteração ecofisiológica descrita na cultura do milho (GAO et al., 2006). A redução da perda de água por meio da transpiração provocou um teor relativo de água em plantas de milho sob condições de deficiência hídrica (KAYA; TUNA; HIGGS, 2006). A análise do teor relativo de água elucida a relação entre o abastecimento de água nos tecidos e a taxa de transpiração (SOLTYS-KALINA et al., 2015). Alguns pesquisadores também defendem uma maior absorção de água pelas plantas tratadas com Si, devido o mesmo desencadear a expressão de genes de aquaporinas (GONG; CHEN, 2012).

Mesmo como um mecanismo de resposta para diminuir a perda de água, uma menor condutância estomática proporciona uma menor transpiração e absorção de CO<sub>2</sub>, podendo haver uma menor fotossíntese (COSTA et al., 2015). Todavia, mesmo com decréscimo na atividade estomática, houve uma maior fotossíntese em plantas de milho sob deficiência hídrica fertilizadas com Si (AMIN et al., 2018). Este aumento pode ser relacionado a proteção dos pigmentos fotossintéticos e enzimas que atuam no processo fotossintético, melhoria no transporte de elétrons durante a etapa fotoquímica, controle de EROs e melhor absorção de nutrientes (MA, YAMAJI, 2006; RASTOGI et al., 2021). Assim, o Si pode proporcionar uma maior eficiência no uso da água em plantas de milho em condições de déficit hídrico (GAO et al., 2005). A análise da eficiência do uso da água descreve a quantidade de CO<sub>2</sub> absorvida pela fotossíntese para uma determinada quantidade de vapor d'água perdido para a

atmosfera (CERNUSAK et al., 2020), gerando uma maior produtividade com menor uso de água (KUMAR et al., 2015).

## 7. AUMENTO DA PRODUTIVIDADE

Por mitigar os efeitos deletérios inerentes à deficiência hídrica e proporcionar alterações fisiológicas e bioquímicas benéficas em plantas de milho um maior crescimento e produtividade tem sido associada a cultura do milho (KAYA; TUNA; HIGGS, 2006). Na cultura do milho sob deficiência hídrica fertilizada com Si, Amin et al. (2018) relatam aumentos de aproximadamente 36% para altura da planta, 15% para diâmetro do caule, 8% para número de folhas, 16% para diâmetro da espiga, 18% para número de grãos por espiga, 14% para peso de 100 grãos e 33% para produtividade de grãos em comparação a plantas não tratadas.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Concluiu-se que a aplicação de Si pode proporcionar melhorias na absorção de nutrientes, osmorregulação e atividade enzimática antioxidante, trocas gasosas, crescimento e produtividade da cultura do milho em condições de deficiência hídrica, que podem ser desencadeadas por vários mecanismos, como fisiológicos e bioquímicos, debatidos nesta revisão.

O foco desta revisão é fazer com que o público amplo entenda os mecanismos envolvidos na mitigação do estresse por deficiência hídrica em plantas de milho proporcionados pelo Si, podendo ajudar pesquisadores no planejamento de um sistema de cultivo sustentável de milho com incrementos de tolerância à seca, especialmente no cenário de mudanças climáticas. Assim, torna-se pertinente o desenvolvimento de mais pesquisas para melhores recomendações de Si para a cultura, com base em cultivares e condições edafoclimáticas, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, Z. et al. Physiological responses of wheat to drought stress and its

mitigation approaches. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, n. 4, p. 1-13, 2018.

AMIN, M. et al. Influence of silicon fertilization on maize performance under limited water supply. **Silicon**, v. 10, n. 2, p. 177-183, 2018.

AMIRJANI, M. R. Effects of cadmium on wheat growth and some physiological factors. **International Journal of Forest**, v. 2, n. 1, p. 50-58, 2012.

AQAEI, P. et al. Response of maize (*Zea mays* L.) to potassium nano-silica application under drought stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 9, p. 1205-1216, 2020.

ARTYSZAK, A.; GOZDOWSKI, D.; KUCINSKA, K. Impact of foliar fertilization on the content of silicon and macronutrients in sugar beet. **Plants**, v. 8, n. 5, p. 136, 2019.

ASMAR, S. A. et al. Changes in leaf anatomy and photosynthesis of micropropagated banana plantlets under different silicon sources. **Scientia Horticulturae**, v. 161, p. 328-332, 2013.

AZEVEDO NETO, A. D. et al. Fluorescência da clorofila como uma ferramenta possível para seleção de tolerância à salinidade em girassol. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 42, n. 4, p. 893-897, 2011.

BAIJI, M.; LUTTS, S.; KINET, J. M. Water deficit effects on solute contribution to osmotic adjustment as a function of leaf ageing in three durum wheat (*Triticum durum* Desf.) cultivars performing differently in arid conditions. **Plant Science**, v. 160, n. 4, p.669-681, 2001.

BAKER, N. R. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. 1, p. 89-113, 2008.

BAKER, N. R.; ROSENQVST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 403, p. 1607-1621, 2004.

BARBOSA, M. R. et al. Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, v. 44, n. 3, p. 453-460, 2014.

BHARDWAJ, S.; KAPOOR, D. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 1044-1053, 2021.

BUKHARI, M. A. et al. Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. **Silicon**, v. 13, n. 12, p. 4757-4772, 2021.

CERNUSAK, L. A. Gas exchange and water-use efficiency in plant canopies. **Plant Biology**, v. 22, n. 1, p. 52-67, 2020.

CINTRA, P. H. N. et al. Análise de fluorescência da clorofila *a* em mudas de café sob estresse hídrico. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 27006-27014, 2020.

CLEMENS, S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. **Planta**, v. 212, n. 4, p. 475-486, 2001.

COSTA, A. S. et al. Respostas fisiológicas e bioquímicas de plantas de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) ao déficit hídrico e posterior recuperação. **IRRIGA**, v. 20, n. 4, p. 705-717, 2015.

DAWOOD, M. G. Influence of osmoregulators on plant tolerance to water stress. **Scientia Agriculturae**, v. 13, n. 1, p. 42-58, 2016.

DEDEMO, G. C. et al. Osmoprotection in sugarcane under water deficit conditions. **Plant Stress**, v. 7, n. 1, p. 1-7, 2013.

DING, L. et al. Is nitrogen a key determinant of water transport and photosynthesis in higher plants upon drought stress? **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1-12, 2018.

EL-MAGEED, T. A. et al. Silicon defensive role in maize (*Zea mays* L.) against drought stress and metals-contaminated irrigation water. **Silicon**, v. 13, n. 7, p. 2165–2176, 2021.

FAROOQ, M. et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 29, p. 185-212, 2009.

FORDOEI, A. R.; BIDGHOLI, R. D. Impact of salinity stress on photochemical efficiency of photosystem II, chlorophyll content and nutrient elements of nitere bush (*Nitraria schoberi* L.) plants. **Journal of Rangeland Science**, v. 6, n. 1, p. 1-9. 2016.

FREW, A. et al. The role of silicon in plant biology: a paradigm shift in research approach. **Annals of Botany**, v. 121, n. 7, p. 1265-1273, 2018.

GAO, X. et al. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, p. 1637-1647, 2006.

GAO, X. et al. Silicon improves water use efficiency in maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 27, n. 8, p. 1457-1470, 2005.

GHASEMI, A. et al. Impact of 24-epibrassinolide, spermine, and silicon on plant growth, antioxidant defense systems, and osmolyte accumulation of maize under water stress. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 1-11, 2022.

GONG, H.; CHEN, K. The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 34, n. 4, p. 1589-1594, 2012.

HABIB, N. Use of nitric oxide and hydrogen peroxide for better yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit conditions: growth, osmoregulation, and antioxidative defense mechanism. **Plants**, v. 9, n. 2, p. 1-24, 2020.

HATTORI, T. et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, v. 123, n. 4, p. 459-466, 2005.

HUSSAIN, S. et al. Foliar application of silicon improves growth of soybean by enhancing carbon metabolism under shading conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 159, p. 43-52, 2021.

ISA M. et al. Silicon enhances growth independent of silica deposition in a low-silica rice mutant. **Plant Soil**, v. 331, p. 361-375, 2010.

JOSEPH, E. A.; RADHAKRISHNAN, V. V.; MOHANAN, K. V. A study on the accumulation of proline - An osmoprotectant amino acid under salt stress in some native rice cultivars of North Kerala, India. **Universal Journal of Agricultural Research**, v. 3, n. 1, p. 15-22, 2015.

KAYA, C.; TUNA, A.; HIGGS, D. Effect of silicon on plant growth and mineral nutrition of maize grown under water-stress conditions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 29, p. 1469-1480, 2006.

KIM, Y.H. et al. Silicon regulates antioxidant activities of crop plants under abiotic-induced oxidative stress: a review. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1-7, 2017.

KUMAR, A. et al. Effect of nutrient-and moisture-management practices on crop productivity, water-use efficiency and energy dynamics in rainfed maize (*Zea mays*) + soybean (*Glycine max*) intercropping system. **Indian Journal of Agronomy**, v. 60, p. 152-156, 2015.

LI, Q.-F.; MA, C.-C.; SHANG, Q.-L. Effects of silicon on photosynthesis and antioxidative enzymes of maize under drought stress. **The Journal of Applied Ecology**, v. 18, n. 3, p. 531-536, 2007.

LICHTENTHALER, H. K. et al. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio  $R_{Fd}$  of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**, v. 43, n. 3, p. 379- 393, 2005.

LONG, S. P.; BERNACCHI C. J. Gas exchange measurements, what can they tell us about the underlying limitations to photosynthesis? Procedures and sources of error. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2393-2401, 2003.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, v. 11, n. 8, p. 392-397, 2006.

MALIK, M. A. et al. Elucidating the role of silicon in drought stress tolerance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 165, p. 187-195, 2021.

MARTINS A. C. et al. Tolerância ao déficit hídrico: adaptação diferencial entre espécies forrageiras. **Iheringia**, v. 73, n. 3, p. 228-239, 2018.

MELO, S. P. et al. Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria grasses*. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 755-759, 2003.

MERHIJ, E. I. The effect of silicon, tillage and the interaction between them on some antioxidants and phytohormones during drought stress of maize (*Zea mays* L.) plants. **Agronomy**, v. 10, p. 1-19, 2020.

MIRZAEI, M.; MOIENI, A.; GHANATI, F. Effects of drought stress on the lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in two canola (*Brassica napus* L.) cultivars. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 15, n. 3, p. 593-602, 2013.

MITANI-UENO, N.; MA, J. F. Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 67, n. 1, p. 10-17, 2021.

MOUSSA, H. R. ABDEL-AZIZ, S. M. Comparative response of drought tolerant and drought sensitive maize genotypes to water stress. **Australian Journal of Crop Science**, v. 1, n. 1, p. 31-36, 2008.

NÄSHOLM, T.; KIELLAND, K.; GANETEG, U. Uptake of organic nitrogen by plants. **New Phytologist**, v. 182, n. 1, p. 31-48, 2009.

NING, D. et al. Silicon-mediated physiological and agronomic responses of maize to drought stress imposed at the vegetative and reproductive stages. **Agronomy**, v. 10, n. 8, p. 1-19, 2020.

OLIVEIRA, R. L. L. et al. Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 4, p. 948-953, 2019.

PANG, Z. et al. Silicon-mediated improvement in tolerance of economically important crops under drought stress. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 17, n. 3, p. 6151-6170, 2019.

PARVEEN, A. et al. Silicon priming regulates morpho-physiological growth and oxidative metabolism in maize under drought stress. **Plants**, v. 8, n. 10, p. 1-14,

2019.

PEI, H. et al. Regulatory function of ethylene in plant responses to drought, cold, and salt stresses. In: PANDEY, G. K. **Mechanism of Plant Hormone Signaling under Stress**. John Wiley & Sons: New Delhi, 2017. p. 327-344.

POIRIER-POCOVI, M.; BAILEY, B. N. Sensitivity analysis of four crop water stress indices to ambient environmental conditions and stomatal conductance. **Scientia Horticulturae**, v. 259, p. 1-31, 2020.

PUPPE, D.; SOMMER, M. Experiments, uptake mechanisms, and functioning of silicon foliar fertilization – a review focusing on maize, rice, and wheat. **Advances in Agronomy**. v. 152, p. 1-49, 2018.

RANJAN, A. et al. Silicon-mediated abiotic and biotic stress mitigation in plants: Underlying mechanisms and potential for stress resilient agriculture. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 163, p. 15-25, 2021.

RAO, G. B.; SUSMITHA, P. Silicon uptake, transportation and accumulation in rice. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 6, n. 6, p. 290-293, 2017.

RASTOGI, A. et al. Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...?. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 169, p. 40-48, 2021.

RATNAKUMAR, P. et al. Effect of ortho-silicic acid exogenous application on wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought. **Journal of Functional and Environmental Botany**, v. 6, n. 1, p. 34-42, 2016.

REIS, L. C. et al. Chlorophyll *a* fluorescence as an indicator of water stress in *Calophyllum brasiliense*. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, v. 48, n. 1, p. 210-220, 2020.

SANTI, L. P.; NURHAIMI, H; MULYANTO, D. Effect of bio-silica on drought tolerance in plants. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 183, p. 1-8, 2018.

SANTOS, C. F.; LIMA, G. P. P.; MORGADO, L. B. Tolerância e caracterização bioquímica em feijão-caupi submetido a estresse hídrico na pré-floração. **Naturalia**, v. 33, n. 1, p. 34-44, 2010.

SANTOS, C. M. et al. Physiological changes associated with antioxidant enzymes in response to sugarcane tolerance to water deficit and rehydration. **Sugar Tech**, v. 17, n. 1, p. 291-304, 2015.

SANTOS, C. M.; SILVA, M. A. Physiological and biochemical responses of sugarcane to oxidative stress induced by water deficit and paraquat. **Acta**

**Physiologiae Plantarum**, v. 37, n. 8, p. 172-185, 2015.

SHARMA, P. et al. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, p. 1-26, 2012.

SHINDE, S. et al. Proline coordination with fatty acid synthesis and redox metabolism of chloroplast and mitochondria. **Plant Physiology**, v. 172, n. 2, p. 1074-1088, 2016.

SILVA, C. E. et al. Drought stress and plant nutrition. **Plant Stress**, v. 5, p. 32-41, 2010.

SIRISUNTORNLAK, N. et al. Effect of seed priming with silicon on growth, yield and nutrient uptake of maize under water-deficit stress. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 13, p. 1869-1885, 2021.

SOLTYS-KALINA, D. et al. The effect of drought stress on the leaf relative water content and tuber yield of a half-sib family of 'Katahdin'-derived potato cultivar. **Breeding Science**, v. 66, n. 328–331, 2016.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, G. C. M. et al. Silicon fertigation with appropriate source reduces water requirement of maize under water deficit. **Plant and Soil**, v. 477, n. 1-2, p. 83-97, 2022.

WANG, Y. Silicon reduces long-term cadmium toxicities in potted garlic plants. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 38, p. 1-9, 2016.

XU, J.; GUO, L.; LIU, L. Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. **Environmental and Experimental Botany**, v. 201, p. 1-19, 2022.

ZHANG, C. et al. Do lignification and silicification of the cell wall precede silicon deposition in the silica cell of the rice (*Oryza sativa* L.) leaf epidermis? **Plant and Soil**, v. 372, n. 1-2, p. 137-149, 2013.