

SILÍCIO: INTERAÇÃO COM O SISTEMA SOLO-PLANTA

Marcella Leite de Campos Menegale¹; Gustavo Spadotti Amaral Castro² e Mauricio Antonio Cuzato Mancuso³

¹University of Washington – School of Environmental and Forest Sciences, 4000 15th Avenue NE, University District, ZIP 98195, Seattle, Washington, USA. E-mail: marcism@uw.edu

²Embrapa Macapá – Rodovia Juscelino Kubitschek, km 05, nº 2600, CEP 68903-419, Macapá, AP. E-mail: gustavo.castro@embrapa.br

³University of Arkansas – Department of Plant Pathology, 495 North Campus Drive, Plant Sciences Building, ZIP 72701, Fayetteville, Arkansas, USA. E-mail: mmancuso@email.uark.edu

RESUMO: O Si apresenta-se de forma abundante na crosta terrestre e está presente em consideráveis quantidades na maioria dos solos, encontrando-se na forma de óxido de silício. O cultivo intensivo e consecutivo leva à diminuição da concentração do elemento no solo. A escassez do elemento no solo reflete de forma significativa a produtividade final de algumas culturas, especialmente as gramíneas acumuladoras. Apesar de sua elevada concentração nas folhas, o Si não é considerado um nutriente, e sim um elemento benéfico às plantas. Sua presença no solo leva a melhorias nas culturas, principalmente quando são considerados os aspectos morfológicos e/ou fisiológicos do ciclo dos vegetais. Estudos revelam a influência do elemento à resistência ao ataque de insetos, nematóides e microrganismos, maior resistência à seca, salinidade, além de contribuir para a melhora no estado nutricional, transpiração e, possivelmente, em alguns aspectos da eficiência fotossintética das plantas. O objetivo do trabalho foi realizar um levantamento bibliográfico detalhado e atualizado sobre o Si e sua interação com o Sistema Solo-Planta, abordando conceitos teóricos sobre o assunto, além de aspectos relacionados à ocorrência do elemento no solo, formas de absorção pelas plantas, e os efeitos causados na cultura a partir do aporte do nutriente.

PALAVRAS-CHAVE: elemento benéfico, resistência biótica e abiótica, atividade de enzimas.

SILICON: INTERACTION WITH SOIL-PLANT SYSTEM

ABSTRACT: Si is found in abundance in the Earth's crust and is present in large concentrations in most soils types as silicon oxide. The intensive and consecutive management of soils contribute to the reduction of its concentration in the colloidal material. The absence of the element in the soil alters substantially the final productivity of some crops, particularly grasses. Despite its high concentration in the leaves, Si is still considered a beneficial element for plants, not yet been recognized as a nutrient. Its presence in the soil leads to improvements in crops, especially when the morphological and/or physiological features of the plant are taken in consideration. Studies have shown the effects of the presence of Si on the resistance to insects, nematodes and microorganisms, as well as resistance to drought and salinity conditions. Yet, it influences the nutritional status of plants, and alters their transpiration rates and possibly, their photosynthetic efficiency. The objective of this study was to write a detailed and updated review on the element Si and its interactions with the Soil-Plant System, including theoretical concepts, as well as aspects related to the incidence of the element in the soil, its chemical forms uptaken by plants, and its influence on the final productivity of crops.

KEY WORDS: beneficial element, biotic and abiotic resistance, enzymes activity.

INTRODUÇÃO

O silício (Si), segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, apesar de não ser considerado um elemento essencial às plantas - pelo fato de não atender aos critérios diretos e indiretos de essencialidade (Jones e Handreck, 1967) - tem se mostrado importante para as mesmas, por apresentar uma série de efeitos benéficos, auxiliando no crescimento e produção das plantas. Está mais presente em solos jovens, como os Cambissolos, e sua origem está diretamente relacionada ao grau de intemperismo dos mesmos.

O elemento é classificado como benéfico ou útil para as plantas, não sendo absolutamente necessário no sistema para que seja completado o ciclo vegetal. Entretanto, estudos comprovam a eficiência do elemento tanto na melhoria de aspectos relacionados à morfologia e estruturação, quanto ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas, principalmente àquelas acumuladoras de Si, como gramíneas, onde estudos avaliando seu efeito vêm sendo mais intensamente realizados. Entretanto, plantas leguminosas vêm, também, tomando espaço nas pesquisas (Marschner, 1995).

Por outro lado, de acordo com Epstein e Bloom (2005), o Si cumpre o segundo dos critérios da nova definição de essencialidade dos nutrientes: “a planta pode ser tão severamente privada do elemento que ela exibe anormalidades em seu crescimento, desenvolvimento ou reprodução, isto é, seu desempenho em comparação com plantas não privadas”, indicando que este nutriente pode ser considerado de grande importância para o desenvolvimento de uma gama de culturas, principalmente as gramíneas, consideradas plantas acumuladoras de Si: arroz, trigo, cana-de-açúcar, entre outras.

Efeitos relacionados à eficiência do elemento podem ser observados nos solos mediante a aplicação de materiais silicatados, os quais atuam positivamente sobre a correção da acidez do solo, neutralização do H e Al tóxicos, além da interação com outros nutrientes, aumentando a concentração dos mesmos na solução do solo, proporcionando maior disponibilidade e absorção pela planta, como é o caso do fósforo.

Nas plantas, podemos relacionar a presença do elemento à maior resistência ao acamamento, diminuição do ataque por pragas e doenças (por conta de alterações na anatomia da planta, como a formação de células epidérmicas mais grossas e maior grau de lignificação e/ou silicificação), maior resistência a condições adversas, causadas por situações de estresse biótico e

abiótico, como menor efeito deletério provocado pela geada, menor taxa de evapotranspiração (em situações de déficit hídrico), favorecimento de nodulação em leguminosas, ativação da atividade de enzimas, efeitos na composição mineral (Malavolta, 2006; Epstein e Bloom, 2005).

Além disso, devido ao acúmulo de Si na epiderme das folhas, o elemento é capaz de ativar genes envolvidos na produção de compostos secundários do metabolismo, como polifenóis e enzimas relacionadas aos mecanismos de defesa das plantas, como as Enzimas Reativas de Oxigênio (ERO) (Gratão et al., 2005).

Vários estudos têm demonstrado efeitos benéficos da aplicação de Si, especialmente em culturas como arroz, aveia-branca, cana-de-açúcar, cevada, feijão, milho, pastagens, sorgo, soja e trigo (Ma et al., 2001; Gong et al., 2005; Hattori et al., 2005; Castro et al., 2011; Soratto et al., 2012; Castro e Crusciol, 2013a; Castro e Crusciol, 2013b; Crusciol et al., 2013; Toledo et al., 2013), abrangendo culturas acumuladoras e não-acumuladoras desse elemento. Porém, o Si ainda é um elemento pouco conhecido e utilizado na agricultura brasileira.

Desse modo, a presente revisão teve por objetivo realizar um levantamento bibliográfico detalhado e atualizado sobre o Si e sua interação com o Sistema Solo-Planta, abordando conceitos teóricos sobre o assunto, além de aspectos relacionados à ocorrência do elemento no solo, formas de absorção pelas plantas, e os efeitos causados na cultura a partir do aporte do nutriente.

Silício no solo

Considerado um dos principais constituintes dos argilo-minerais no processo de formação dos solos, o Si pode afetar de forma significativa a nutrição das plantas. Os solos brasileiros, devido ao alto grau de intemperismo, apresentam em média cerca de 5 a 40% de Si em suas composições (Ma et al., 2001).

Constituinte básico da estrutura da maioria dos argilominerais, o óxido de silício (SiO_2) é considerado o mineral mais abundante nos solos. Porém, em função do acelerado grau de intemperismo dos solos tropicais, o Si encontra-se, basicamente, na forma de opala e quartzo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Estudos realizados em meados da década de 80 (TISDALE et al., 1985), consideram que solos mais jovens, como os Cambissolos, apresentam maiores teores do elemento; já aqueles mais intemperizados, como os Latossolos, apresentam os teores em menores concentrações.

O Si está presente no solo de diversas formas: pode ser encontrado em minerais primários, minerais secundários, ou então, adsorvido aos coloides do material. Porém, encontramos maior concentração do nutriente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), disponível na solução do solo, onde a maior parte não se encontra dissociada, fato este que torna o nutriente mais prontamente disponível para as plantas, levando, também, a possíveis perdas por lixiviação. Dessa forma, conclui-se que a quantidade do elemento disponível na solução do solo é diretamente dependente da estabilidade dos minerais da fase sólida, ou seja, ocorre correlação positiva entre os teores do elemento e os teores de argila no material coloidal (Meyer e Keeping, 2001).

O elemento é absorvido de forma ativa por proteínas de membranas sintetizadas a partir de gene específico (Ma e Takahashi, 2002). Dessa forma, podemos considerar que sua absorção pelas plantas pode ocorrer ao longo de todo o ciclo da mesma, já que não segue um gradiente de concentração. A incidência da forma dissociada do elemento – ácido silícico (H_4SiO_4) – está intimamente relacionada ao pH do solo, já que o pH da rizosfera apresenta importante influência sobre a solubilidade dos nutrientes e sua absorção pelas raízes (Marschner e Römheld, 1983).

Para as culturas do arroz e do milho, assim como para a maioria das plantas acumuladoras de Si, a disponibilidade do elemento no solo e sua conseqüente absorção pelas plantas estão intimamente relacionados ao pH do solo: quanto maior o pH, maior a disponibilidade do elemento no solo, levando, conseqüentemente, à maior absorção pela planta (Oliveira et al., 2007; Castro e Crusciol, 2013a; Castro e Crusciol, 2013b).

Considerando-se a série liotrópica dos elementos no solo (Fassbender, 1978), onde os nutrientes são classificados de acordo com a susceptibilidade de lixiviação e com seu raio iônico, temos que o silicato é um dos elementos mais facilmente lixiviáveis no perfil do solo. A partir disso, pode-se estabelecer que, assim como o Na e o K, o íon silicato apresenta menor efeito agregante no solo, o que facilita o caminhamento do elemento ao longo do perfil, aumentando perdas por lixiviação, evidenciada nos baixos teores deste elemento em solos tropicais.

As principais fontes do nutriente, presentes na solução do solo são resultado da decomposição de resíduos vegetais, dissociação do ácido silícico polimérico, liberação de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Jones e Handreck, 1967). Além disso, podemos incluir o nutriente no sistema a partir da adição de fertilizantes silicatados e também da água de irrigação.

Grande número de materiais tem sido utilizado como fonte de Si para as plantas, dentre eles as escórias de siderurgia, wollastonita, metassilicato de cálcio, silicato de potássio, termofosfato, silicato de cálcio e silicato de magnésio (Prado e Fernandes, 2001; Castro, 2009) a fim de promover a correção da acidez dos solos, além de adicionar Si ao sistema solo-planta.

No Brasil, o material mais utilizado para fins de correção de acidez dos solos é o calcário, sendo este o mais barato e eficiente modo de se elevar o índice de eficiência do fertilizante empregado em áreas de produção de grãos. Porém, como este material é pouco solúvel e os produtos da sua reação têm mobilidade limitada, sua ação inicial normalmente fica restrita às camadas superficiais, principalmente em solos cultivados sob Sistema Plantio Direto, pela ausência de revolvimento do mesmo (Soratto e Crusciol, 2008; Castro et al., 2014). A utilização de materiais contendo Si em sua constituição para a correção da acidez é válida, desde que contenham um “constituente neutralizante” como óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio e/ou magnésio.

Com relação à solubilidade dos materiais silicatados, estudos sugerem que o silicato de cálcio apresenta solubilidade 6,78 vezes maior que o carbonato de cálcio ($\text{CaCO}_3 = 0,014 \text{ g dm}^{-3}$; $\text{CaSiO}_3 = 0,095 \text{ g dm}^{-3}$) (Alcarde e Rodella, 2003).

Materiais contendo o íon silicato em sua composição, como o silicato de cálcio e magnésio, além das vantagens de promoverem a elevação do pH, dos teores de cálcio e de magnésio trocáveis, CTC e V% (Prado e Fernandes, 2003; Castro e Crusciol, 2013a) aumento na disponibilidade de fósforo (Castro e Crusciol, 2013b) e redução de toxidez de ferro, manganês e alumínio (Castro e Crusciol, 2013a; 2013b) são ainda, fonte de Si para as plantas, pelo fato de apresentarem em sua composição constituintes neutralizantes (SiO_3) (Alcarde e Rodella, 2003). Apresentam, também, micronutrientes (com efeito fertilizante), sendo, portanto, justificado seu uso como corretivo de acidez (Prado et al., 2002; Carvalho-Pupatto et al., 2004). A recomendação de aplicação deve ser baseada em qualquer um dos métodos utilizados para recomendação de calagem (Korndörfer et al., 2004).

Corrêa et al. (2009), em estudo realizado sobre a adição de escória de aciaria em solo cultivado sob Sistema Plantio Direto, afirmam que o silicato presente no material exerce função corretiva no solo, podendo ser comparado ao calcário, por apresentar maior solubilidade, além de levar à neutralização da acidez do solo, pelo fato de apresentar, em sua constituição, elementos como CaO, CaOH, SiO_3 e NaOH.

Em ensaio realizado em Latossolo Vermelho distroférico típico avaliando-se o efeito de doses de silicato de cálcio em comparação com aplicação de calcário em diferentes profundidades e épocas de avaliação, Luz et al. (2011) observaram aumentos significativos da aplicação do silicato nas concentrações de $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$, Ca, Mg, K, H+Al e V% quando em comparação com o calcário, para todas as profundidades avaliadas, em curto período de reação dos materiais no solo; entretanto, o material calcário proporcionou melhor efeito de correção a longo prazo.

Camargo et al. (2007), avaliando o efeito da reação do solo a partir de diferentes materiais silicatados (silicato de cálcio e magnésio, ácido silícico e wollastonita), em comparação ao calcário calcítico, sobre a disponibilidade de Si e a produção de matéria seca e absorção do nutriente por plantas de arroz, concluíram que a absorção de Si pela parte aérea das plantas foi linearmente crescente com as doses de wollastonita, seguida do silicato de cálcio e magnésio, ácido silícico e calcário calcítico. Relacionando os efeitos sobre o pH do solo, os materiais avaliados, com exceção do ácido silícico, proporcionaram aumento favorável para a variável analisada.

Pulz et al. (2008), avaliando os efeitos da aplicação de silicato de cálcio e magnésio na correção das características químicas do solo, e sua consequente influência na nutrição e produtividade de tubérculos de batata observaram que, para o parâmetro correção das características químicas do solo, os tratamentos com silicato de cálcio e magnésio e calcário não diferiram estatisticamente entre si. Entretanto, o material silicatado proporcionou maior disponibilidade de P e Si no solo e maior absorção destes elementos pelas plantas de batata, resultado em aumento da produtividade e melhor arquitetura das plantas.

Em estudo realizado objetivando-se avaliar alterações na disponibilidade de fósforo durante o estabelecimento do capim-marandu, por meio da aplicação conjunta de fosfato e silicato, em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, a combinação de doses intermediárias de fósforo e altas doses de Si levam a maior número de folhas expandidas, área foliar, e consequente maior produção de matéria seca (Melo et al., 2007).

Sobral et al., (2011), com o intuito de avaliar a disposição final da escória de aciaria de forno elétrico e o fornecimento de Si, macronutrientes (Ca, Mg e P), micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, Ni) e elementos tóxicos (Cd e Pb) para a cultura da cana-de-açúcar observaram que o material silicatado aumentou significativamente os teores de Ca, Mg, P, Si, Fe, Mn e Zn no solo e

reduziu a acidez potencial, além de aumento na área foliar e na altura dos colmos, tanto quanto no teor de Zn nas folhas. Não foi detectada a presença de Ni, Cd e Pb no solo nem na planta, indicando, desta forma, que a utilização do material residual não causa danos ambientais ao sistema.

Além disso, considera-se que o íon silicato apresenta forte interação com outros íons dentro do complexo de troca de íons. É comprovada a forte relação entre o Si e a neutralização do alumínio tóxico no solo (Prabagar et al., 2011; Castro e Crusciol, 2013a). Além disso, podemos citar, também, a “competição” entre os íons silicato e fosfato pelo mesmo sítio de adsorção dentro do complexo de troca de íons no solo. Sugere-se que o silicato desloca o P do coloide, liberando-o para a solução do solo, pelo fato do ânion silicato ocupar os pontos de adsorção do ânion fosfato (Epstein e Bloom, 2005).

Estudo realizado a fim de quantificar a dessorção competitiva entre os ânions silicato e fosfato na fração argila gibbsítica de um Gleissolo Melânico, com o Si e o fósforo previamente adsorvidos ao material coloidal, adicionando-se, na sequência, o fósforo e o Si intercalados, mostra que a aplicação prévia de Si reduziu a fixação de fosfato. Desse modo, a aplicação de Si previamente à de fósforo favorece a fitodisponibilidade deste em solos altamente intemperizados, evidenciando a interação entre os dois nutrientes (Pozza et al., 2007).

Alguns autores sugerem que o fornecimento de Si às plantas possa aliviar a toxidez de Mn e Fe não somente pela redução na sua absorção, mas também porque aumenta o nível de tolerância interna ao excesso de Mn nos tecidos. (Accioly et al., 2009). Como exemplo, na cultura da cana-de-açúcar, o melhor crescimento está associado a uma relação Mn/SiO₂ na folha na ordem de 30 a 50, sendo o teor de Si próximo a 0,7%, levando a crer que a presença do elemento Si leve a maior acúmulo de Mn no vacúolo.

Silício nas plantas

Estudos mostram que o Si é absorvido pelas plantas preferencialmente na forma de ácido monossilícico (H₄SiO₄) que, em solos com pH ácido, encontra-se em sua forma não dissociada, e com disponibilidade afetada pelo pH, temperatura, teor de matéria orgânica do solo e concentração de Si na solução (Jones e Handreck, 1967).

Os vasos do xilema são os responsáveis pelo transporte do elemento na planta, e sua distribuição é diretamente dependente das taxas de transpiração dos órgãos. Esta distribuição varia de acordo com a espécie estudada: ocorre de maneira uniforme em plantas que acumulam pouco Si, e nas acumuladoras, como o arroz (*Oryza sativa*), 90% do elemento encontra-se na parte aérea (Mengel e Kirkby, 1987).

Podemos encontrar maior concentração de Si em tecidos suportes do caule e das folhas, e também nos grãos, em baixa concentração. De toda a quantidade do elemento acumulado nas plantas, 99% encontra-se na forma de ácido silícico polimerizado, fórmula esta de difícil solubilização.

Considera-se, normalmente, que a concentração média de Si nas raízes seja um décimo da concentração no caule, e sua movimentação dentro da planta depende das concentrações presentes na solução do solo, além da taxa transpiratória do órgão e da espécie em questão (Marschner, 1995).

As plantas podem ser divididas de acordo com sua capacidade de absorção e acúmulo de Si nos órgãos, e esta quantificação é altamente variável entre as espécies. São considerados três grupos: plantas acumuladoras (entre 100 a 150 g kg⁻¹ de Si), intermediárias (10 a 50 g kg⁻¹ de Si) e não-acumuladoras (concentrações abaixo de 5 g kg⁻¹ de Si). As gramíneas, consideradas acumuladoras, absorvem Si da solução do solo de forma passiva – o elemento acompanha o fluxo de massa da água (Myake e Takahashi, 1983). Plantas consideradas não-acumuladoras, como as dicotiledôneas, absorvem o Si mais lentamente que a absorção de água, o que acaba gerando um aumento na concentração do elemento no meio (Adatia e Besford, 1986).

É fato que o Si, em sua forma de sílica amorfa (Si₂.nH₂O), se acumula na parede celular dos órgãos de transpiração, levando, desse modo, à formação de uma dupla camada de sílica-cutícula e sílica-celulosa (Ma e Yamaji, 2006). Tal camada protetora apresenta relação positiva com a redução da transpiração pela planta (Barbosa Filho et al., 2001), diminuindo a quantidade de água evapotranspirada ao longo do ciclo, tornando a planta menos exigente em água e mais resistente a possíveis situações de seca. Além disso, essa camada protetora formada funciona como barreira de resistência mecânica à invasão de fungos e bactérias para o interior da planta (Berni e Prabhu, 2003) aumentando, neste aspecto, a resistência pelas plantas (Melo et al., 2003).

Apesar de não ser considerado elemento essencial às plantas, estudos relacionam a aplicação de Si ao solo com o crescimento e aumento de produtividade das culturas, principalmente as espécies gramíneas, consideradas acumuladoras (Castro, 2009).

A fim de avaliar a eficiência de fontes de Si para a cultura do arroz, Ramos et al. (2008), em estudo conduzido em campo, observaram que, em comparação com as fontes Siligran e Silicon, a fonte-padrão wollastonita proporcionou melhor resposta linear sobre a disponibilidade de Si no solo e absorção pela cultura, levando, dessa forma, a aumentos nos teores do nutriente na parte aérea, casca e massa seca total. Também Camargo et al. (2007), estudando a reação do solo sobre a disponibilidade de Si para a cultura do arroz, utilizando-se materiais silicatados (silicato de cálcio e magnésio, ácido silícico puríssimo e wollastonita), além da testemunha calcário, observou que a absorção de Si pela parte aérea da cultura foi linearmente crescente com as doses da wollastonita, seguida do silicato de cálcio e magnésio, ácido silícico e calcário, as quais diferem entre si de acordo com a porcentagem de Si existente no material.

Por outro lado, Pereira Junior et al. (2010), avaliando a influência de doses de Si na cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) não observaram influência significativa sobre as características agronômicas e também sobre a produtividade final da cultura. Ainda não estão muito bem definidos os benefícios do Si sobre plantas leguminosas ou não-acumuladoras, o que depende de estudos mais aplicados, haja vista que, para a mesma cultura, Castro e Crusciol (2013b) obtiveram resultados positivos com a aplicação de silicato comparativamente à aplicação de calcário. Também, Mancuso et al. (2014) observaram que houve translocação de Si das raízes para a parte aérea de plantas de café arábica (não-acumuladoras).

Ainda, o aumento da capacidade fotossintética das plantas pode estar relacionado à presença do elemento no sistema, proporcionando melhor arranjo das folhas, tornando-as mais eretas e mais resistentes a possíveis danos. Além disso, é notável a redução na evapotranspiração das folhas, melhorando o aproveitamento da água disponível no solo (Agarie et al., 1998). Gao et al. (2006), estudando os efeitos do Si sobre a taxa transpiratória e condutância estomática de plantas de trigo em condições de déficit hídrico, observaram significativa redução das mesmas tanto na superfície abaxial quanto na adaxial das folhas, porém tais efeitos não foram observados sobre a cutícula. Tais resultados apontam o papel do Si na diminuição da taxa transpiratória das plantas, a qual pode ser amplamente atribuída à atividade dos estômatos. Portanto, podemos considerar como promissora a utilização de silicato de cálcio e magnésio para correção da acidez

do solo, uma vez que, com características semelhantes ao calcário, o material apresenta, ainda, a vantagem de ser mais solúvel, atingindo maiores profundidades de correção e em menor tempo.

Além disso, o fornecimento de Si poderia acarretar maior estabilidade produtiva, em razão da maior tolerância ao estresse hídrico, uma vez que a quase totalidade da produção de grãos está situada em áreas com ocorrência de veranicos, principalmente na região dos cerrados. Nota-se, ainda, que a maioria dos trabalhos realizados demonstre apenas o efeito da aplicação de corretivos na nutrição e produtividade das culturas, sem, no entanto, verificar qual componente da produção foi alterado, visto que estes podem ser alterados por condições climáticas, fertilidade do solo e práticas agrícolas, refletindo na produtividade de grãos (Castro, 2009).

Silício e tolerância a estresses biótico e abiótico

Efeitos benéficos da adubação com Si têm sido observados em espécies vegetais, especialmente quando submetidas a estresse de natureza biótica ou abiótica. Tais efeitos são observados, principalmente, em espécies gramíneas, denominadas plantas “acumuladoras” de Si (Ma et al., 2001). Segundo Raven (2003), o Si é depositado na forma de sílica gel na parede celular da epiderme das folhas, colmos e casca, formando uma dupla camada de sílica-cutícula e sílica-celulose. A deposição do Si aumenta o fortalecimento e a rigidez da parede celular, aumentando, portanto, a resistência das plantas ao ataque de pragas, doenças, acamamento, melhora a interceptação de luz e diminui a transpiração (Barbosa Filho et al., 2001). Marschner (1995) afirma que o Si acumulado junto aos estômatos reduz a taxa de transpiração, diminuindo, dessa forma, o consumo de água pela planta.

O aumento da disponibilidade de Si tem resultado em incrementos no crescimento e na produtividade, uma vez que o elemento pode atuar de forma indireta sobre alguns aspectos fotossintéticos e bioquímicos, e especialmente quando estas plantas estão submetidas a algum tipo de estresse, seja de natureza biótica ou abiótica (Ma e Yamaji, 2006; Abdalla, 2011). Estresses causados por temperaturas extremas, veranicos, metais pesados ou tóxicos, por exemplo, podem ter seus efeitos reduzidos com o uso do Si (Barbosa Filho et al., 2000; Crusciol et al., 2009; Abdalla, 2011; Prabagar et al., 2011). A fertilização com Si pode, também, aumentar a resistência a várias doenças fúngicas, bem como, para algumas pragas (Berni e Prabhu, 2003; Goussain et al., 2002). O elemento pode, também, amenizar a toxicidade causada por metais

pesados, como manganês, ferro e alumínio (Hodson e Evans, 1995). Estudos realizados com as culturas arroz, pepino e feijão-caupi comprovam a eficiência do elemento em neutralizar a ação de tais metais pesados (Liang et al., 2007).

Explicações para tais efeitos, como a redução do transporte de manganês pelas raízes e parte aérea e a homogeneidade de sua distribuição, evitando, dessa forma, a concentração do elemento nas folhas e a formação de necroses foram sugeridas em 1978, em estudo realizado por Horst e Marschner, o qual apresenta conformidade com pesquisas recentes (Rogalla e Römheld, 2002), onde são apresentados os mecanismos envolvidos na redução de tal toxidez. No caso do alumínio, sua neutralização pelo Si, segundo Hodson e Sangster (2002), ocorre por meio da formação de hidroxialumino-silicatos (HOS).

Estresses bióticos

Perdas de âmbito econômico nas culturas são muito comuns por conta do ataque de fungos e doenças, levando a diminuições nas produtividades e também menores valor agregado e qualidade do produto final. Doenças economicamente importantes como a mancha marrom no trigo, brusone, queima das bainhas e mancha parda no arroz, além da antracnose do sorgo e danos causados à cultura da cana-de-açúcar por conta da infestação por pragas (Keeping e Meyer, 2006) têm sido eficientemente controladas pelo fornecimento de Si às plantas.

Domiciano et al. (2010), objetivando avaliar o efeito do silício no progresso da mancha marrom na folha bandeira de duas cultivares de trigo, causada por *Bipolaris sorokiniana*, em ensaio conduzido em casa de vegetação, concluíram que a aplicação de Si apresenta efeito positivo no sentido de aumentar a resistência da folha bandeira da cultura à infecção por *B. sorokiniana*, além de garantir alta produção de grãos, uma vez que a folha bandeira apresenta importante função fisiológica ao longo do ciclo da planta.

Pereira et al. (2009), avaliando o efeito da aplicação foliar de Si na redução da severidade da ferrugem do cafeeiro, além da possível potencialização da atividade de seis enzimas relacionadas à resistência das plantas a patógenos, utilizando-se o silicato de potássio como fonte de Si, observaram redução significativa na severidade da doença, não observando, no entanto, potencialização da atividade das enzimas de defesa avaliadas. Também para a cultura do cafeeiro, Pozza et al. (2004) observaram redução de 63,2% de folhas de café (*Coffea arabica* L.) afetadas por *Cercospora coffeicola* Berkeley Cooke, além de 43% no total de lesões por plantas a partir da

aplicação de 1 g de silicato de cálcio incorporado em 1 kg de substrato. Além disso, verificou-se aumento significativo nos teores de Si foliar nas plantas adubadas com Si, quando comparadas ao tratamento testemunha.

A aplicação de Si no arroz apresenta resultados favoráveis com relação à diminuição da incidência de doenças na cultura. Em experimento realizado no Estado do Tocantins, avaliando-se a eficiência da aplicação de fontes de Si (silicato de cálcio, silicato de cálcio e magnésio e silicato de potássio) sobre a incidência de mancha parda e brusone na cultura, foram observadas respostas diferentes de acordo com a fonte utilizada. O silicato de cálcio foi mais eficiente na redução efetiva da mancha parda e brusone, não prejudicando a produtividade final. Já o silicato de cálcio e magnésio e o silicato de potássio não se mostraram eficientes no controle das doenças, afetando significativamente na produtividade final (Santos et al., 2011). Supõe-se que essa diferença de eficiência entre as fontes de Si esteja relacionada à quantidade de Si presente no material.

Para a cultura da batata, no entanto, a aplicação de Si para a diminuição do grau de infestação por pulgões e vaquinhas não apresentou resultados significativos quando comparado à testemunha absoluta, bem como o desenvolvimento e produtividade da cultura (Silva et al., 2010). Tais resultados condizem com os de Gomes et al. (2008), onde a avaliação de apenas um ciclo da cultura da batata não foi suficiente para expressar resultados significativos mediante a aplicação de Si para o controle de pulgão.

Estresses abióticos

A tolerância de plantas a condições desfavoráveis, principalmente em relação ao déficit hídrico, tem sido associada ao acúmulo de enzimas na parte aérea, indicando ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta, a partir da redução do potencial hídrico celular, levando, conseqüentemente, ao fechamento dos estômatos e ao desenvolvimento de processos oxidativos, por meio do acúmulo de prolina, considerada como mecanismo regulador de perda de água na planta, além da formação das espécies reativas de oxigênio (ROS): as enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (Gratão et al., 2005).

Sugere-se na literatura que o Si seja capaz de diminuir os efeitos causados por situações hídricas adversas. A deposição de Si na parede celular das folhas, formando uma dupla camada

protetora evita grandes perdas de água nestas condições, devido à menor taxa de evapotranspiração da planta (Marschner, 1995). Como já citado anteriormente, Gao et al. (2006) observaram relação positiva entre o depósito de Si nas folhas e a diminuição da taxa transpiratória para a cultura do trigo, submetidas a diferentes regimes hídricos. Isso evidencia o melhor aproveitamento da água disponível no solo.

Gong et al. (2008), em estudo realizado objetivando-se avaliar as alterações fotossintéticas de plantas de trigo mediante aplicação de Si em condições de estresse hídrico concluíram que o elemento proporcionou aumento na taxa de CO₂ assimilável pelas folhas mediante o estresse e aumento da concentração das enzimas relacionadas ao estresse hídrico, diminuindo os impactos do estresse pela planta. Isso nos leva a concluir que o Si pode estar envolvido nas atividades metabólicas e/ou fisiológicas das plantas submetidas a condições de estresse hídrico.

Em contrapartida, Melo et al. (2003), estudando o efeito da aplicação de Si sobre a produção de matéria seca de duas espécies do gênero *Brachiaria*, em condições de diferentes regimes hídricos no solo observaram que, apesar de as plantas terem acumulado altas quantidades de Si na parte aérea, a tolerância de ambas ao déficit hídrico não foi evidenciada na presença do elemento. Tais resultados não foram condizentes com os relatados por Agaric et al. (1998) e Ma et al. (2001), onde a correlação entre o elemento e a disponibilidade hídrica foi dada como positiva e satisfatória.

Com relação ao estresse salino, existem na literatura evidências de que a adição de Si ao sistema é capaz de diminuir os efeitos causados por tal condição adversa. Nestas condições, o crescimento da planta é comprometido por conta do abaixamento do potencial osmótico da solução do solo, levando ao estresse hídrico e conseqüentemente, a injúrias no metabolismo, além de desordens nutricionais (Munns e Tester, 2008).

Estudos relacionando a aplicação de Si para a diminuição do estresse salino em plantas vêm sendo há tempos desenvolvidos, sendo inicialmente proposto por Ahmad (1992) com plantas de trigo e com resultados favoráveis mediante a redução da toxidez causada pelo excesso de NaCl na solução do solo. Pesquisas recentes corroboram para a veracidade de tal afirmação (Zhu et al., 2004).

Lima et al. (2011) observaram efeito semelhante em plantas de milho submetidas a condições adversas de salinidade mediante aplicação de silicato de sódio, em diferentes doses, em solução nutritiva. Foram observados efeitos significativos com relação aos parâmetros de

crescimento da cultura, além da redução dos danos causados na membrana e atenuação dos efeitos tóxicos do NaCl no crescimento das plântulas de milho. Já para a cultura do feijão-de-corda, os mesmos autores não notaram efeito significativo do Si para diminuição dos danos causados pelo aumento da salinidade.

Com relação à redução da toxidez de metais pesados pela presença de Si, estudos vêm sendo realizados a fim de comprovar tal fato. Como já comentado anteriormente, entende-se que existam mecanismos envolvidos no processo e que viabilizam tal redução da toxidez, a partir da formação de complexos que neutralizem o elemento tóxico, como é o caso do alumínio, o qual é neutralizado pela formação de hidroxialumino-silicatos (HOS) (Hodson e Sangster, 2002).

Liang et al. (2007), avaliando o efeito do Si sobre o crescimento de plantas de milho, em solo contaminado com cádmio observaram que a presença do Si pode efetivamente amenizar os efeitos tóxicos causados nas plantas por conta da presença do metal pesado. Tal efeito pode ser atribuído à imobilização do cádmio e à sua fitoavaliabilidade decorrente do aumento do pH do solo pela presença do silicato, proporcionando melhor desenvolvimento da planta.

Em plantas de pepino submetidas a condições de excesso de manganês no solo, a aplicação de Si proporcionou efeitos positivos, inibindo o aparecimento de sintomas de toxidez, além de ter proporcionado o crescimento das plantas (Shi et al, 2005). Considera-se, dessa forma, que a redução da toxicidade do manganês proporcionada pelo Si ocorreu não somente à diminuição da concentração de Mn solúvel no apoplasto, mas também ao aumento da concentração de silício no órgão, o que levou ao fortalecimento das paredes.

CONCLUSÕES

A controvérsia sobre a essencialidade do Si não pode subjugar sua importância para o Sistema Solo-Planta, visto que os benefícios proporcionados pela aplicação de fontes deste elemento, destacadamente o uso de silicatos de cálcio e magnésio, proporcionam respostas positivas das culturas, em razão não somente da absorção do Si, mas também de suas reações no solo, que possibilitam o aumento dos teores de P e redução de alguns metais pesados, o que pode resultar numa maior estabilidade produtiva por parte da cadeia do agronegócio.

Novas técnicas de extratores do solo e novos estudos relacionando a eficiência da aplicação do Si com fenômenos ecofisiológicos das culturas devem ser estimulados, visando quantificar e compreender melhor como um elemento tido como não essencial para as culturas,

consegue afetar de tantas maneiras as culturas, resultando em ganhos reais de produtividade de diversas culturas, sejam elas acumuladoras de Si ou não. Tais estudos devem aprofundar não só resultados isolados, mas tentar compreender a complexidade das alterações fisiológicas que envolvem a boa nutrição por Si, podendo-se inclusive, adicionar este elemento às recomendações de adubação em boletins e informativos.

REFERÊNCIAS

ABDALLA, M.M. Beneficial effects of diatomite on growth, the biochemical contents and polymorphic DNA in *Lupinus albus* plants grown under water stress. **Agriculture and Biology Journal of North America**, v.2, p.207-220, 2011.

ACCIOLY, A.M.A.; SOARES, C.R.F.S.; SIQUEIRA, J.O. Silicato de cálcio como amenizante da toxidez de metais pesados em mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.2, p.180-188, 2009.

ADATIA, M.H.; BESFORD, R.T. The effects of silicon on cucumber plant grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, London, v.58, p.343-351, 1986.

AGARIE, S; UCHIDA, H; AGATA, W; KUBOTA, F; KAUFMAN, P. T. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, Tokyo, v.1, p.89-95, 1998.

AHMAD, R.; ZAHEER, S.; ISMAIL, S. Role of silicon in salt tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.). **Plant Science**, v.85, n.1, p.43-50, 1992.

ALCARDE, J.A.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N. et al. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3, p.291-334.

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.325-30, 2001.

BARBOSA FILHO, M.P.; SNYDER, G.H.; PRABHU, A.S.; DATNOFF, L.E.; KORNDÖRFER, G.H. Importância do silício para a cultura do arroz (uma revisão de literatura). **Informações Agronômicas**, v.89, p.1-8, 2000.

BERNI, R.F.; PRABHU, A.S. Eficiência relativa de fontes de silício no controle de bruzone nas folhas em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.195-201, 2003.

CAMARGO, M.S.; PEREIRA, H.S.; KORNDÖRFER, G.H.; QUEIROZ, A.A.; REIS, C.B. Soil reaction and absorption of silicone by rice. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, n.2, p.176-180, 2007.

CARVALHO-PUPATTO, J.G.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, p.1213-1218, 2004.

CASTRO, G.S.A. **Alterações físicas e químicas do solo em função do sistema de produção e da aplicação superficial de silicato e calcário**. UNESP Botucatu, 2009. Dissertação Mestrado, p.160.

CASTRO, G.S.A.; CALONEGO, J.C.; CRUSCIOL, C.A.C. Propriedades físicas do solo em sistemas de rotação de culturas conforme o uso de corretivos da acidez. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, p.1690-1698, 2011.

CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, Amsterdam, v.195-196, p.234-242, 2013a.
CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C. Yield and mineral nutrition of soybean, maize, and Congo signal grass as affected by limestone and slag. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 673-681, 2013b.

CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C.; CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Management Impacts on Soil Organic Matter of Tropical Soils. **Vadose Zone Journal**, v.1, p.8, 2014.

CORRÊA, J.C.; BULL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MORAES, M.H., Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.263-271, 2009.

CRUSCIOL C.A.C.; PULZ, A.L.; LEMOS, L.B.; SORATTO, R.P.; LIMA, G.P.P. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. **Crop Science**, v.49, p.949-954, 2009.

CRUSCIOL, C.A.C.; CASTRO, G.S.A.; SORATTO, R.P.; COSTA, C.H.M.; FERRARI NETO, J. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agrônômica**, v.44, p.404-410, 2013.

DOMICIANO, G.P.; RODRIGUES, F.A.; MOREIRA, W.R.; OLIVEIRA, H.V.; VALE, X.R.; XAVIER FILHA, M.S. Silício no progresso da mancha marrom na folha bandeira do trigo. **Tropical Plant Pathology**, v.35, n.3, p.186-189, 2010.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. Sunderland: Sinauer Associates, 400 p., 2005.

FASSBENDER, H.W. **Química de Suelos, con Énfasis en Suelos de América Latina**. Ed. IICA. San José, Costa Rica, 398 p., 1978.

GAO, X.; ZOU, C.; WANG, L.; ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.29, p.1637-1647, 2006.

GOMES, F.B.; MORAES, J.C.; SANTOS, C.D.D.; ANTUNES, C.S. Uso de silício como indutor de resistência em batata a *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v.37, n.2, p.185-190, 2008.

GONG H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v.169, p.313-321, 2005.

GONG, H.J.; CHEN, K.M.; ZHAO, Z.G.; CHEN, G.C.; ZHOU, W.J. Effects of silicon on defense of wheat against oxidative stress under drought at different developmental stages. **Biologia Plantarum**, v.52, n.3, p.592-596, 2008.

GOUSSAIN, M.M.; MORAES, J.C.; CARVALHO, J.G.; NOGUEIRA, N.L.; ROSSI, M.L. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta do cartucho *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, v.31, p.305-310, 2002.

GRATÃO, P.L.; POLLE, A.; LEA, P.J.; AZEVEDO, R.A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, p.481-494, 2005.

HATTORI T.; INANAGA S.; ARAKI H.; PING A.; MORITA S.; LUXOVA M.; LUX A. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, v.123, p.459-466, 2005.

HODSON, M.J.; SANGSTER, A.G. Silicon and abiotic stress, In: Second Silicon in Agriculture Conference. **Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition**, Tsuruoka, Yamagata. p. 99-104, 2002.

HODSON, M.J.; EVANS, D.E. Aluminium/silicon interactions in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, v.46, p.161-171, 1995.

HORST, W.J.; MARSCHNER, H. Effect of silicon on manganese tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). **Plant Soil**, v.50, p.287-303, 1978.

JONES, L.H.P.; HANDRECK, K.A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, v.19, p.107-149, 1967.

KEEPING, M.G.; MEYER, J.H. Silicon-mediated resistance of sugarcane to *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae): effects on silicon source and cultivar. **Journal of Applied Entomology**, v.130, n.8, p.410-420, 2006.

KORNDORFER, G.H.; NOLLA, A.; LARA CABEZAS, W.A.R. Impacto ambiental del uso de la vinaza en la agricultura y su influencia en las características químicas y físicas del suelo en: Encuentro sobre vinazas, potasio y elementos menores para una agricultura sostenible. Palmira, Colombia, 14 y 15 de mayo de 2004, **Corpoica**, 2004. 233 p.

LIANG, Y.; SUN, W.; ZHU, Y.G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, v.147, p.422-428, 2007.

LIMA, M.A.; CASTRO, V.F.; VIDAL, J.B.; ENÉAS-FILHO, J. Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agrônômica**, v.42, n.2, p.398-403, 2011.

LUZ, P.H.C.; FARIA, L.A.; MACEDO, F.B.; HERLING, V.R.; SANCHES, A.B.; RODRIGUES, R.C. Effect of silicate fertilization on soil and on palisade grass plants under grazing intensities. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.40, n.7, p.1458-1465, 2011.

MA, J.F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants, In: DATNOFLF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. (Eds). **Silicon in Agriculture**. The Netherland, Elsevier Science, p.17-39. 2001.

MA, J.F.; TAKAHASHI, E. Soil fertilizer and plant silicon research in japan. **Kyoto University Technical Conferences**, v.5, p.112, 2002.

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

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Ceres, 2006. 631p.

MANCUSO, M.A.C.; SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; CASTRO, G.S.A. Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1448-1456, 2014.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London, Academic Press, 920p., 1995.

MARSCHNER, H.; ROMHELD, V. *In vivo* measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: effect of plant species and nitrogen source. **Zeitschrift für Pflanzenphysiologie**, v.111, p.241-251, 1983.

MELO, S.P.; KORNDÖRFER, G.H., KORNDÖRFER, C.M., LANA, R.M.Q., SANTANA, D.G. Silicon accumulation and water déficit tolerance in *Brachiaria* grasses. **Scientia Agricola**, v.60, n.4, p.755-759, 2003.

MELO, S.P.; MONTEIRO, F.A.; MANFREDINI, D. Silicate and phosphate combinations for marandu pallisadegrass growing on an oxisol. **Scientia Agricola**, v.64, p.275-281, 2007.

MENGEL K; KIRKBY, EA. **Principles of Plant Nutrition**. Worblaufen-Bern, Switzerland: International Potash Institute, 1987.

MEYER, J.H.; KEEPING, M.G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H., eds. **Silicon in agriculture**. Amsterdam, Elsevier Science, p.257-276, 2001.

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of solution-cultured cucumber plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.29, p.71-83, 1983.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of Salinity Tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, n.1, p.651-681, 2008.

OLIVEIRA, L.A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, A.C. Acumulação de silício em arroz de diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.685-690, 2007.

PEREIRA JÚNIOR, P.; REZENDE, P.M.; MALFITANO, S.C.; LIMA, R.K.; CORRÊA, L.V.T.; CARVALHO, E.R. Efeito de doses de silício sobre a produtividade e características agronômicas da soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.4, p.908-913, 2010.

PEREIRA, S.C.; RODRIGUES, F.A.; CARRÉ-MISSIO, V.; OLIVEIRA, M.G.A.; ZAMBOLIM, L. Efeito da aplicação foliar de silício na resistência à ferrugem e na potencialização da atividade de enzimas de defesa em cafeeiro. **Tropical Plant Pathology**, v.34, n.4, p.223-230, 2009.

POZZA, A.A.; ALVES, E.; POZZA, E.A.; CARVALHO, J.G.; MONTANARI, M.; GUIMARÃES, P.T.G.; SANTOS, D.M. Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, v.29, p.185-18, 2004.

POZZA, A.A.A.; CURTI, N.; COSTA, E.T.S.; GUILHERME, L.R.G.; MELO MARQUES, J.J.G.S.; MOTTA, P.E.F. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos e gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.11, p.1627-1633, 2007.

PRABAGAR, S.; HODSON M.J.; EVANS, D.E. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst). **Environmental and Experimental Botany**, v.70, p.266-276, 2011.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p.1199-1204, 2001.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.287-286, 2003.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; COUTINHO, E.L.M., ROQUE, C.G.; VILLAR, M.L.P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcário como corretivo da acidez do solo no cultivo de alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.539-546, 2002.

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, n.4, p.1651-1659, 2008.

RAMOS, L.A.; KORNDÖRFER, G.H.; NOLLA, A. Acúmulo de silício em plantas de arroz do ecossistema de várzea submetido à aplicação de diferentes fontes. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.3, p.751-757, 2008.

RAVEN J.A. Cycling silicon-the role of accumulation in plant. **New Phytologist**, v.158, p.419-421, 2003.

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

SANTOS, G.R.; CASTRO NETO, M.D.; RAMOS, L.N.; SARMENTO, R.A.; KORNDÖRFER, G.H.; IGNÁCIO, M. Effect of silicon sources on rice diseases and yield in the State of Tocantins, Brazil. **Acta Scientiarum**, v.33, n.3, p.451-456, 2011.

SHI, Q.; BAO, Z. ZHU, Z.; HE, Y. QIAN, Q.; YU, J. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. **Phytochemistry**, v.66, p.1551-1559, 2005.

SILVA, V.F.; MORAES, J.C.; MELO, B.A. Influence of silicone on the development, productivity and infestation by insect pests in potato crops. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.6, p.1465-1469, 2010.

SOBRAL, M.F.; NASCIMENTO, C.W.A.; CUNHA, K.P.V.; FERREIRA, H.A.; SILVA, A.J.; SILVA, F.B.V. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.867-872, 2011.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes pela aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.38, n.4, p.928-935, 2008.

SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; CASTRO, G.S.A.; COSTA, C.H.M.; FERRARI NETO, J. Leaf application of silicic acid to white oat and wheat. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1538-1544, 2012.

TISDALE, S.L.; BEATON, J.D.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 4.ed. New York: Mac Millan, 1985. 754p.

TOLEDO, M.Z.; CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Physiological quality of soybean and wheat seeds produced with alternative potassium sources. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, p. 363-371, 2011.

ZHU, Z.; WEI, G.; LI, J.; QIAN, Q.; YU, Z. Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzymes activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.). **Plant Science**, v.167, p.527-533, 2004.