

HISTÓRIA E USO DO SILICATO DE SÓDIO NA AGRICULTURA

Oscar Fontão de Lima Filho



História e Uso do Silicato de Sódio na Agricultura

República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Reinhold Stephanes

Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Conselho de Administração

José Gerardo Fontelles

Presidente

Pedro Antonio Arraes Pereira

Vice-Presidente

Murilo Francisco Barella

Derli Dossa

Antonio Salazar Pessoa Brandão

Aloisio Lopes Pereira de Melo

Membros

Diretoria-Executiva

Pedro Antonio Arraes Pereira

Diretor-Presidente

Tatiana Deane de Abreu Sá

José Geraldo Eugênio de França

Kepler Euclides Filho

Diretores-Executivos

Embrapa Agropecuária Oeste

Fernando Mendes Lamas

Chefe-Geral

Guilherme Lafourcade Asmus

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Manoel Galdino da Silva

Chefe-Adjunto de Administração

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agropecuária Oeste
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

História e Uso do Silicato de Sódio na Agricultura

Oscar Fontão de Lima Filho

*Embrapa Agropecuária Oeste
Dourados, MS
2009*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agropecuária Oeste

BR 163, km 253,6 - Trecho Dourados-Caarapó
Caixa Postal 661
79804-970 Dourados, MS
Fone: (67) 3416-9700
Fax: (67) 3416-9721
www.cpao.embrapa.br
E-mail: sac@cpao.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Guilherme Lafourcade Asmus*

Secretária-Executiva: *Karina Neoob de Carvalho Castro*

Membros: *Claudio Lazzarotto, Gessi Cecon, Harley Nonato de Oliveira, Josiléia Acordi Zanatta, Milton Parron Padovan, Oscar Fontão de Lima Filho e Silvia Mara Belloni.*

Membros suplentes: *Alceu Richetti e Carlos Ricardo Fietz.*

Supervisão editorial, Revisão de texto e Editoração eletrônica:

Eliete do Nascimento Ferreira

Normalização bibliográfica:

Eli de Lourdes Vasconcelos

Ilustração da capa: *Van Jader Arte 3d*

1ª edição

(2009): online

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei Nº 9.610).

CIP-Catálogo-na-Publicação.
Embrapa Agropecuária Oeste.

Lima Filho, Oscar Fontão de
História e uso do silicato de sódio na agricultura / Oscar Fontão de
Lima Filho. — Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2009.
112 p. ; 21 cm.

ISBN 978-85-7540-021-0

1. Silicato de sódio - História - Uso - Agricultura. I. Embrapa
Agropecuária Oeste. I. Título.

CDD (21.ed.) 631.81

© Embrapa 2009

Autor

Oscar Fontão de Lima Filho

Engenheiro Agrônomo, Dr. em Ciências (Nutrição de Plantas), Pesquisador da Embrapa Agropecuária Oeste, Caixa Postal 661, 79804-970 Dourados, MS.

Fone: (67) 3416-9771

Fax: (67) 3416-9721

E-mail: oscar@cpao.embrapa.br

Apresentação

A importância do silício para a nutrição das plantas é a abordagem principal desta obra, que a *Embrapa Agropecuária Oeste* coloca à disposição de pesquisadores, professores, estudantes, profissionais da área de ciências agrárias e produtores rurais.

A sustentabilidade da atividade agropecuária e a produção de alimentos saudáveis são assuntos abordados com grande profundidade nesta publicação.

Acredita-se que este livro é mais uma significativa contribuição da *Embrapa Agropecuária Oeste* para a agricultura brasileira, considerando a forma em que foi escrito e a riqueza de informações nele contidas.

Fernando Mendes Lamas
Chefe-Geral
Embrapa Agropecuária Oeste

Sumário

Resumo	11
Abstract	13
1. Introdução	15
2. O silício	19
3. O silício nas plantas	23
4. O silício no solo	27
5. O silício nos seres humanos	31
6. Caracterização e fabricação do silicato de sódio	35
7. O silicato de sódio e o desenvolvimento das plantas	41
8. O silicato de sódio e as interações nutricionais	51
9. O silicato de sódio e as doenças	59
10. O silicato de sódio e as pragas	71
11. O silicato de sódio e outros estresses	77
12. O silicato de sódio na agricultura orgânica	83
13. Considerações finais	85
14. Referências	87

História e Uso do Silicato de Sódio na Agricultura

Oscar Fontão de Lima Filho

Resumo

O livro descreve a importância do silício para a vida das plantas e para os seres humanos. Apresenta, de modo geral, a ocorrência e as principais características do silício em solos e plantas. Mostra, também, que o seu uso na agricultura é antigo, principalmente tendo o metassilicato ou o silicato de sódio como fontes de silício. São descritos o processo de fabricação e os efeitos da sua suplementação em plantas. São apresentados resultados de pesquisa englobando os efeitos do silício nas plantas, na forma de metassilicato ou silicato de sódio, aplicado via foliar ou no substrato, no metabolismo e crescimento vegetal, nas interações com outros elementos, em doenças, pragas e estresses de modo geral, além do seu uso na agricultura orgânica.

History and Use of Sodium Silicate in Agriculture

Abstract

The book describes the importance of silicon for the life of plants and humans. In general, presents the occurrence and main features of the silicon in soils and plants. Also demonstrates that its use in agriculture is too old, especially with the water glass as the source. Describes the process of manufacturing of sodium metasilicate or sodium silicate and the effects of its supplementation in plants. Research results are presented showing the effects of silicon in plants, in the sodium silicate or metasilicate form, applied by foliar or dressing fertilization in the metabolism and plant growth, among interactions with others elements, in diseases, pests and stresses in general, besides the use in organic agriculture.

1. Introdução

O uso de fertilizantes com silício surgiu antes mesmo de o Homem ter noção da existência e da importância desse elemento para as plantas. Há milênios, os camponeses chineses e romanos já utilizavam cinzas de cereais para fertilizar os campos de cultivo, prática incentivada pelos sábios da época, como Virgílio (Publius Vergilius Maro, 70 - 19 a.C.). Um dos fatores responsáveis pelos efeitos favoráveis da mistura dessas cinzas, aos solos depauperados, devia-se à capacidade dessas plantas em acumular altos teores de sílica em seus tecidos.

Nossos ancestrais, pela sabedoria empírica passada de geração em geração, utilizavam extratos de cavalinha (*Equisetum arvense* L.) para combater doenças em suas plantações. Esta planta é riquíssima em silício, sem o qual não consegue sobreviver (BÉLANGER et al., 1995). Livros e textos que tratam da agricultura orgânica e agroecológica apresentam receitas específicas com essa planta para combater doenças.

Em 1811, Gay Lussac (1778-1850) e Louis Thenard (1777-1857) prepararam o silício amorfo impuro por aquecimento do

fluoreto de silício (SiF_4) com potássio. No entanto, atribui-se a descoberta do silício a Jacob Berzelius (1779-1848) em 1823, que preparou o silício amorfo como seus antecessores, mas purificou-o com sucessivas lavagens para retirar os fluossilicatos, conseguindo isolar o elemento. Em 1814, o cientista inglês Humprey Davy (1778-1829) escrevia em seu livro “Elements of agricultural chemistry, in a course of lectures for the board of agriculture” (DAVY, 1815, p. 158):

A epiderme silicosa das plantas serve como um suporte, protege a casca da ação de insetos e parece fazer parte na economia destas tribos vegetais frágeis (Gramíneas e Equisetáceas), semelhante àquelas desempenhadas no reino animal pelas conchas de insetos crustáceos.

A partir de meados do século 19, alguns cientistas escreviam sobre a importância do silício para as plantas. Em seu livro “Organic Chemistry in its application to agriculture and physiology” (1840), Justus von Liebig (1803-1873), agrônomo e químico alemão, foi o primeiro a sugerir o uso do silício como fertilizante, na forma de silicato de sódio. Também foi o primeiro pesquisador a realizar um experimento em casa de vegetação, utilizando este elemento como fertilizante. No mesmo sentido, Dmitry Mendeleev (1834-1907), químico russo, sugeria, em 1870, o uso da sílica amorfa como fertilizante silicatado.

John Bennet Lawes (1814-1900), fundador da Estação Experimental de Rothamsted, na Inglaterra, iniciou os primeiros experimentos de campo com fertilizantes silicatados em 1862

(SILICON..., 2000). Outros pesquisadores do mesmo instituto, como Daniel Hall (1864-1942), publicaram trabalhos sobre o efeito do silicato de sódio em gramíneas, principalmente cevada (HALL, 1929). Em 1912, o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos publicava resultados positivos sobre o uso de silicatos obtidos em ensaios de campo em 1910, incluindo o silicato de potássio como fertilizante (RESULTS..., 1912). Outros pesquisadores também publicavam, no início do século 20, resultados de anos de pesquisas utilizando o silicato de potássio como fertilizante (WEIN, 1910a,b,c; BREHMER, 1911.)

Publicações científicas americanas e alemãs do início do século 20 mostravam que o uso do silicato de potássio como fertilizante tinha efeitos extremamente favoráveis sobre as plantas, melhores, inclusive, que os demais sais potássicos utilizados como comparativos, como será visto mais adiante.

Os exemplos citados mostram que pesquisadores pioneiros já anteviam o papel importante que o silício poderia desempenhar na agricultura. Entretanto, até há pouco tempo, nutricionistas e fisiologistas de plantas davam pouca atenção a este elemento, talvez pela onipresença e abundância do mesmo na crosta terrestre, fazendo crer na ausência de carências. O efeito profilático da aplicação de silicatos foliares foi mais estudado a partir de meados do século 20. Cientistas de todo o mundo comprovam os benefícios advindos do uso do silicato de potássio ou do silicato de sódio como fertilizantes foliares e/ou como indutores abióticos de resistência sistêmica a pragas e doenças, com estudos para elucidar os mecanismos de atuação desses produtos sobre as plantas e doenças fúngicas, principalmente.

Textos multidisciplinares na área agrícola, com informações da pesquisa recente, podem ser obtidos em Datnoff et al. (1999), Silicon in Agriculture Conference (2002; 2005; 2008) e em revistas especializadas, principalmente nas áreas de nutrição de plantas, fertilidade de solos e fitossanidade.

2. O silício

O silício é um elemento cinza-escuro com propriedades elétricas e físicas de um semimetal, desempenhando no reino mineral um papel cuja importância pode ser comparável ao carbono nos reinos vegetal e animal. Semelhante a este, porém de modo menos intenso, o silício possui a capacidade de formar longas cadeias, muitas vezes ramificadas. A palavra silício provém do latim *sílax*, rocha constituída de sílica (dióxido de silício) amorfa hidratada e sílica microcristalina, a qual era utilizada, pela sua dureza, na confecção de utensílios e armas na Era Pré-Metálica ou Paleolítica (LIMAFILHO et al., 1999).

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, com 27% de participação em massa, superado apenas pelo oxigênio. O silício não é encontrado na sua forma elementar na natureza por causa de sua alta afinidade pelo oxigênio. É encontrado somente em formas combinadas, como a sílica e minerais silicatados, com fórmula geral $\text{Si}_a\text{O}_b\text{X}_c$, no qual X representa um ou mais cátions, tais como alumínio (aluminossilicatos), magnésio (talco), cálcio (wollastonita), magnésio e ferro (olivina) e muitos outros, além da presença quase

constante do hidrogênio. As letras a, b e c ditam a estequiometria e a estrutura do mineral. Silicatos que estão presentes no dia a dia, como o vidro e a areia, contêm somente hidrogênio como cátion acompanhante, com uma notação geral simplificada de SiO_2 (SRIPANYAKORN et al., 2005).

Cerca de 80% dos minerais das rochas ígneas e metamórficas são silicatos, enquanto em rochas sedimentárias o conteúdo é menor. Os silicatos são sais nos quais a sílica é combinada com oxigênio e outros elementos, como Al, Mg, Ca, Na, Fe e K, em mais de 95% das rochas terrestres, correspondendo a 87% da massa destas. Estão presentes em meteoritos, em todas as águas, atmosfera (pó silicoso), vegetais e animais. Sua presença no sol e outras estrelas também é indicada por espectroscopia. Os minerais silicatados mais comuns são o quartzo, os feldspatos alcalinos e os plagioclásios. Os dois últimos são aluminossilicatos, contribuindo significativamente com o conteúdo de alumínio na crosta terrestre. Todos estes minerais sofrem o processo de intemperização, cuja taxa depende de uma série de fatores, incluindo temperatura, pH, composição iônica do solvente, etc. O quartzo é relativamente estável, decompondo-se muito lentamente; portanto, não é considerado uma fonte de ácido silícico. Os feldspatos, por sua vez, intemperizam-se mais rapidamente, resultando em argilas (caulinita ou montmorilonita) e ácido silícico (EXLEY, 1998). A composição isotópica do silício, constante tanto na crosta terrestre como em meteoritos, é: ^{28}Si - 92,28%, ^{29}Si - 4,67%, ^{30}Si - 3,05% (LIMA FILHO et al., 1999).

Com a pesquisa científica demonstrando e a prática agrícola comprovando os inúmeros benefícios da adubação silicatada, foliar e/ou radicular para as plantas, torna-se relevante focar a importância do silício sob duas óticas: da planta e do consumidor desta planta ou de seus derivados.

3. O silício nas plantas

A relação entre a absorção do silício e o crescimento vegetal foi investigada pela primeira vez há mais de 100 anos. O silício é um nutriente em diatomáceas, que o absorvem ativamente, provavelmente através do co-transporte com o sódio. A falta de silício afeta negativamente a síntese de DNA e de clorofila nestes organismos (WERNER, 1977; RAVEN, 1983). É essencial, também, para radiolárias e coanoflagelados. A essencialidade do silício para as plantas superiores, porém, foi demonstrada apenas para algumas espécies, apesar de ser um constituinte majoritário dos vegetais (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995). Chen e Lewin (1969) comprovaram a essencialidade do silício para membros da família *Equisetaceae* (“cavalinha” ou “rabo de cavalo”).

A comprovação da essencialidade do silício é muito difícil de ser obtida, devido a sua ubiquidade na biosfera. O silício está presente em quantidades significativas mesmo em sais nutrientes, água e ar altamente purificados (WERNER; ROTH, 1983). Deve-se considerar, ainda, as limitações em exaurir o silício do meio nutriente. Os conceitos de essencialidade estabelecidos por Arnon

e Stout (1939) são, até hoje, utilizados pelos nutricionistas e fisiologistas: 1) a deficiência torna impossível para a planta completar o estágio vegetativo ou reprodutivo do seu ciclo de vida; 2) tal deficiência é específica para o elemento em questão, podendo ser corrigida ou impedida somente com o seu fornecimento; 3) o elemento está diretamente envolvido na nutrição da planta, sendo constituinte de um metabólito essencial ou exigido para a ação de um sistema enzimático, independentemente dos possíveis efeitos em corrigir alguma condição microbiológica ou química desfavorável do solo ou outro meio de cultura. Por estes critérios, a essencialidade para o silício foi demonstrada apenas para alguns grupos de plantas.

Epstein (1999) coloca o silício na categoria de “quase essencial”. De acordo com o autor, define-se um elemento como “quase essencial” quando ele se encontra onipresente nas plantas e sua deficiência pode ser severa ou suficiente para apresentar efeitos ou anormalidades no crescimento, desenvolvimento, reprodução ou viabilidade.

Pode-se definir a essencialidade de um elemento quando a diminuição da resistência da planta a qualquer fator estressante, seja ele biótico ou abiótico, ocorre quando a concentração desse elemento está abaixo de um limite crítico (EXLEY, 1998). O silício enquadra-se nesta definição, já que a sua carência pode resultar em diminuição da capacidade biológica da planta em resistir às condições adversas do meio ambiente (RAFI et al., 1997).

Estudos científicos têm demonstrado aumentos significativos na taxa fotossintética, melhoria da arquitetura foliar e

de outros processos no metabolismo vegetal, em resposta à suplementação com silício, tendo como resultado final aumento e maior qualidade na produção. O silício tem um papel importante nas relações planta-ambiente, pois pode dar às culturas condições para suportar adversidades climáticas, edáficas e biológicas.

A utilização do silício na agricultura torna-se particularmente interessante quando considerado como um antiestressante natural. Estresses causados por temperaturas extremas, veranicos, metais pesados ou tóxicos, por exemplo, podem ter seus efeitos mitigados com o uso do silício. A fertilização com silício pode aumentar a resistência a várias doenças fúngicas, bem como para algumas pragas. A acumulação de silício na epiderme também favorece a penetração da luz no dossel da planta, por manter as folhas mais eretas. O estímulo na fotossíntese e no teor de clorofila, devido à suplementação com silício, aumenta a assimilação de nitrogênio em compostos orgânicos nas células, o suprimento de carboidratos, o fornecimento de material para a parede celular e a atividade radicular. Com isso, há maior absorção de água e nutrientes, notadamente de nitrogênio, fósforo e potássio, e maior poder de oxidação das raízes. Desta maneira, o maior desenvolvimento e produtividade são consequências muitas vezes observadas nas suplementações com silicatos solúveis para as plantas (ADATIA; BESFORD, 1986; MARSCHNER, 1995; TAKAHASHI, 1995; SAVANT et al., 1997; EPSTEIN, 1999).

4. O silício no solo

Existe uma relação estreita positiva entre a fertilidade natural dos solos e o teor de silício disponível para as plantas, como foi comprovada por Lima Filho et al. (2005b) ao estudar 35 solos virgens no Estado de Mato Grosso do Sul. Solos tropicais e subtropicais sujeitos à intemperização e lixiviação, com cultivos sucessivos, tendem a apresentar baixos níveis de silício trocável. Estes solos, normalmente, apresentam baixo pH, alto teor de alumínio, baixa saturação em bases e alta capacidade de fixação de fósforo, além de uma atividade microbiológica reduzida. Solos arenosos são particularmente pobres em silício assimilável pelas plantas.

Ao adicionar um nutriente ao solo por meio da adubação, ocorrem reações químicas que podem modificar os teores disponíveis de outros elementos, para mais ou para menos. No caso do silício, ocorrem interações com vários elementos que favorecem a nutrição da planta. O ácido monossilícico, forma solúvel presente na solução do solo e pela qual a planta absorve o silício, ajuda a proteger as plantas dos efeitos tóxicos do alumínio pela formação de hidroxialuminossilicatos inertes. Mas esta

propriedade não se restringe apenas ao alumínio. O ácido silícico pode reagir com outros metais como ferro, manganês, cádmio, chumbo, zinco, mercúrio e outros, formando silicatos desses metais (SAVANT et al., 1997; EPSTEIN, 1999).

Em plantas superiores, o silício pode diminuir o efeito deletério de estresses abióticos causados por metais pesados ou tóxicos, quando em excesso, por meio de alguns mecanismos, tais como aumento na síntese de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos; compartimentação de íons metálicos na planta, como por exemplo cádmio nos vacúolos; inibição do transporte raiz-parte aérea; complexação ou co-precipitação do metal com o silício ou compostos fenólicos liberados pela planta e imobilização do íon metálico no meio de crescimento (LIANG et al., 2007).

Em estudos com manganês, por exemplo, o efeito do silício em mitigar os efeitos de toxidez desse metal foi relacionado a vários aspectos, incluindo maior ligação do manganês à parede celular, diminuindo sua concentração no simplasto, diminuição na peroxidação lipídica e aumento na atividade de enzimas antioxidantes. A toxidez do manganês nas plantas caracteriza-se pelo aumento de compostos fenólicos, responsáveis pelas manchas pardas e necróticas nas folhas. A adição de silício suprime o aumento na síntese de ácidos fenólicos causados pelo excesso de manganês, diminuindo ou mesmo impedindo o aparecimento dos sintomas de toxidez (CHISHAKI; HORIGUCHI, 1997; ROGALLA; ROMHELD, 2001; 2002; WIESE et al., 2007; MAKSIMOVIC et al., 2007; STOYANOVA et al., 2008).

A toxidez por alumínio em plantas é um problema que atinge vastas regiões com solos ácidos em todo o mundo. A formação de hidroxialuminossilicatos acima de pH 4,0 no solo reduz a toxicidade do alumínio. Inúmeros trabalhos também mostram a codeposição de Al/Si em tecidos vegetais, diminuindo os efeitos deletérios do alumínio na planta (HODSON; SANGSTER, 2002).

Em casos de estresses salinos o silício também pode ser benéfico. A concentração de sódio na parte aérea da planta diminui sensivelmente quando se adiciona silício em substratos com carência neste elemento (TAKAHASHI, 1995; SAVANT et al., 1997; EPSTEIN, 1999). Em revisão sobre o tema, Liang et al. (2007) apresentam resultados de diversos estudos e os possíveis mecanismos envolvidos na maior tolerância de plantas à toxicidade salina, mediados pelo silício.

O uso de fertilizantes silicatados, que normalmente apresentam boas propriedades de adsorção, aumenta a eficiência da adubação NPK, proporcionando menor lixiviação de potássio e outros nutrientes móveis no horizonte superficial. Com o aumento no teor de silicato no solo ocorrem reações químicas de troca entre o silicato e fosfatos. Desta maneira, há a formação de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, por exemplo, com a liberação do íon fosfato, aumentando o teor de fósforo na solução do solo. Estudos indicam, também, a possibilidade de o silício aumentar a translocação interna do fósforo para a parte aérea da planta. No caso do nitrogênio, ocorrendo maior taxa fotossintética e outros eventos, resultando em maior desenvolvimento da planta, há uma maior incorporação desse nutriente nos esqueletos carbônicos

para produção de compostos nitrogenados, incluindo proteínas, contribuindo para a sua maior absorção radicular (TAKAHASHI, 1995; SAVANT, 1997; EPSTEIN, 1999).

5. O silício nos seres humanos

O silício é essencial para animais. A confirmação ocorreu quando ratos e pintos apresentaram redução de peso e mudanças patológicas na formação e nas estruturas de tecidos conectivos colagenosos e dos ossos. A deficiência de silício afetou a osteogênese em ratos (SCHWARZ; MILNE, 1972) e a síntese de tecidos conectivos em pintos (CARLISLE, 1972). O silício é o terceiro elemento traço essencial mais abundante do corpo humano, após o ferro e o zinco. Os teores mais altos de silício ocorrem em tecidos conectivos, especialmente aorta, traqueia, tendões, ossos e pele, além de outros órgãos, como timo, suprarrenais, pâncreas, fígado, coração, músculo, pulmão e baço, por exemplo. Também existe silício não associado a proteínas no sangue. O conteúdo elevado em tecidos conectivos se deve, provavelmente, à ligação do silício a cadeias polissacarídicas longas e não ramificadas, denominadas de glicosaminoglicanos e a seus complexos com proteínas (SOLOMONS, 1984; CARLISLE, 1997; SRIPANYAKORN et al., 2005).

Além de promover a biossíntese de colágeno e a formação e calcificação dos tecidos ósseos, o silício está envolvido no

metabolismo de fosfolípidos, bem como afeta o conteúdo de cálcio no corpo, o qual está associado intimamente à idade. O silício também está associado à lã animal e às moléculas de queratina de chifres (KOLESNIKOV; GINS, 2001). A deficiência de silício pode aumentar a suscetibilidade a doenças, como artrite degenerativa e arteriosclerose, bem como o envelhecimento precoce da pele e a fragilidade das unhas (LOEPER et al., 1979; LAÍN, 1995; KOLESNIKOV; GINS, 2001).

Como se pode notar, é fundamental que a dieta alimentar contenha níveis adequados de silício. Ainda não foram estabelecidos os valores nutricionais adequados para a ingestão de silício, mas estima-se que a dieta humana diária deva conter de 20 a 30 mg de SiO_2 (MONCEAUX, 1960; KOLESNIKOV; GINS, 2001).

Alguns fatores podem contribuir para que a ingestão de silício seja subótima, induzindo carências marginais em humanos, que podem levar à debilitação de tecidos que o requerem em maior quantidade, como tecido conjuntivo, tendões, ossos, pele, pêlos e unhas. Esses fatores estão ligados principalmente à produção dos alimentos no campo: 1) cultivares modernos com potencial cada vez maior de extração de nutrientes, principalmente em função da maior produtividade; 2) exportação de silício por meio das colheitas sem a devida reposição do elemento; 3) solos naturalmente pobres em silício disponível para as plantas; 4) uso crescente de defensivos que diminuem a população de microrganismos do solo, os quais atuam como solubilizadores de

silicatos; 5) menor consumo de fibras, onde se concentra uma grande parte do silício nos alimentos, pela população.

Todas essas questões citadas vão de encontro ao fato de que o homem está geneticamente condicionado a consumir níveis de silício bem mais elevados que os atuais, pois a sua dieta tem sido rica em fibras há milhares de anos. Atualmente, porém, o maior consumo de alimentos processados e mais pobres em fibras, particularmente em países mais desenvolvidos, contribui para a menor ingestão de silício. Uma fonte importante desse elemento é a água potável consumida pela população, cujos níveis de silício variam, principalmente, com a sua origem geológica. Com o advento do tratamento da água com sulfato de alumínio para agregar partículas no processo da floculação, os teores de silício ficam ainda mais baixos (PERRY; KEELING-TUCKER, 1998).

6. Caracterização e fabricação do silicato de sódio

O silicato de sódio é um composto que tem a fórmula geral $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, disponível tanto em solução aquosa como na forma sólida, utilizado amplamente em vários setores da indústria. Segundo Fernandes (2009), a capacidade instalada de produção de silicato de sódio no Brasil está ao redor de 600 mil toneladas anuais¹.

As principais aplicações do silicato de sódio são: produção de sílicas sintéticas e zeólitas (sílica precipitada, sílica coloidal, sílica gel, silicoaluminatos de sódio); “builder” (estruturante) e agente de tamponamento para detergentes; fabricação de desengraxantes alcalinos; estabilizador do peróxido de hidrogênio (branqueamento do papel e alvejamento do algodão); agente aglomerante (fabricação de tubetes, fundição - processo CO_2 , argamassas refratárias, fabricação de eletrodos de solda, etc.); defloculante para a indústria cerâmica e de mineração; tratamento de água (FERNANDES, 2009)¹.

¹ Informação verbal fornecida por S. R. Fernandes, em Mogi das Cruzes, SP, em maio de 2009.

Diluído em água e aplicado via foliar em diversas culturas, é aprovado universalmente na agricultura orgânica para a diminuição dos danos causados por pragas e doenças e aumento no vigor das plantas. Também é utilizado como fonte de silício em pesquisas científicas, com aplicação no solo ou na parte aérea das plantas.

A fabricação do silicato de sódio e sua utilização por vários setores da indústria é antiga, com aperfeiçoamentos constantes na sua manufatura ao longo dos anos, como pode ser constatado em várias publicações e patentes, como por exemplo em Propfe (1896), Weismuller (1907), Verrier (1908), Vesterberg (1912), Perazzo (1920) e outros, até os dias atuais. Os silicatos de sódio podem ser comercializados na forma de soluções aquosas ou de sólidos parcialmente hidratados.

As informações a seguir são baseadas em Weldes e Lange (1969); Iler (1979); John (1995); Encyclopedia... (2005); Silicato... (2009); Soluble... (2008); Understanding... (2009) e Fernandes (2009)².

A família dos silicatos de sódio, também conhecidos como vidro solúvel (“waterglass”), apresenta vários compostos que contêm óxido de sódio (Na_2O) e sílica (SiO_2), ou uma mistura de silicatos de sódio, variando as relações ponderais de SiO_2 e Na_2O , teor de sólidos, densidade e viscosidade. Tradicionalmente, os

² Informação verbal fornecida por S. R. Fernandes, em Mogi das Cruzes, SP, em maio de 2009.

silicatos de sódio são classificados como ortossilicato (Na_4SiO_4); metassilicato (Na_2SiO_3); dissilicato ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) e tetrassilicato ($\text{Na}_2\text{Si}_4\text{O}_9$). Eles também são classificados por um método de difração de raios-X de acordo com a sua estrutura cristalina. Todos estes compostos são incolores e transparentes, disponíveis comercialmente na forma de pó ou de solução viscosa. Algumas formas são solúveis e outras são quase insolúveis, sendo facilmente dissolvidos por aquecimento com água sob pressão.

O processo convencional na fabricação do silicato de sódio consiste na mistura da sílica (SiO_2) com o carbonato de sódio (Na_2CO_3) ou, menos frequentemente, com sulfato de sódio (Na_2SO_4), que são fundidos em forno com alta temperatura e pressão, cerca de $1.200\text{ }^\circ\text{C}$ a $1.500\text{ }^\circ\text{C}$. Um segundo processo envolve a dissolução de mineral silicatado (areia, calcedônia, opala, diatomito, etc.) em solução de hidróxido de sódio (NaOH), também com alta temperatura e pressão, este último mais comum no Brasil.

A mistura vítrea é submetida à alta pressão em autoclave, havendo injeção de vapor e água. Forma-se, então, um fluido claro e levemente viscoso, sem odor e completamente solúvel em água. A solução, fortemente alcalina, é estável sob todas as condições de uso e armazenamento. A solução pode ser seca para formar cristais hidratados de silicato de sódio (metassilicato de sódio). As propriedades finais do silicato produzido dependem da relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, que pode ser alterada pela adição de NaOH durante o processo, o qual pode ser resumido pela equação:



Assim, o silicato de sódio contém três componentes: a sílica, que é o constituinte primário; o álcali, representado pelo óxido de sódio, e a água, que confere as características de hidratação.

Os silicatos de sódio solúveis são polímeros de silicatos. Quanto maior o grau de polimerização, maior a proporção de átomos de oxigênio partilhados pelos tetraedros de SiO_4^{-2} ; portanto, maior a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, a qual é denominada de “módulo de sílica” e que varia de 1,6 a 3,75. Mesmo sendo possível produzir silicatos com módulos acima de quatro, na prática a solubilidade é muito baixa. A razão $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ do silicato, geralmente expressa em massa, determina as propriedades físicas e químicas do produto e sua atividade funcional. A variação dessa relação permite múltiplos usos para o silicato de sódio. À medida que cresce a relação $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, cresce a viscosidade e diminui o pH. Com o aumento da concentração a solução vai aumentando sua viscosidade até tornar-se um sólido. Por esta razão, soluções comerciais com maior módulo de sílica são fornecidas com menor concentração de sólidos totais.

A Fig. 1 apresenta o fluxograma da fabricação do silicato de sódio, pelo processo de fusão ou hidrotérmico. Pelo primeiro processo (a), a fusão entre o carbonato e a areia ocorre no forno à temperatura de 1.500 °C. Posteriormente, o produto obtido dessa fusão (100% silicato de sódio) é enviado à autoclave e adicionada água. Sob pressão, o silicato é digerido, tornando-se uma solução de silicato de sódio, que é posteriormente filtrada.

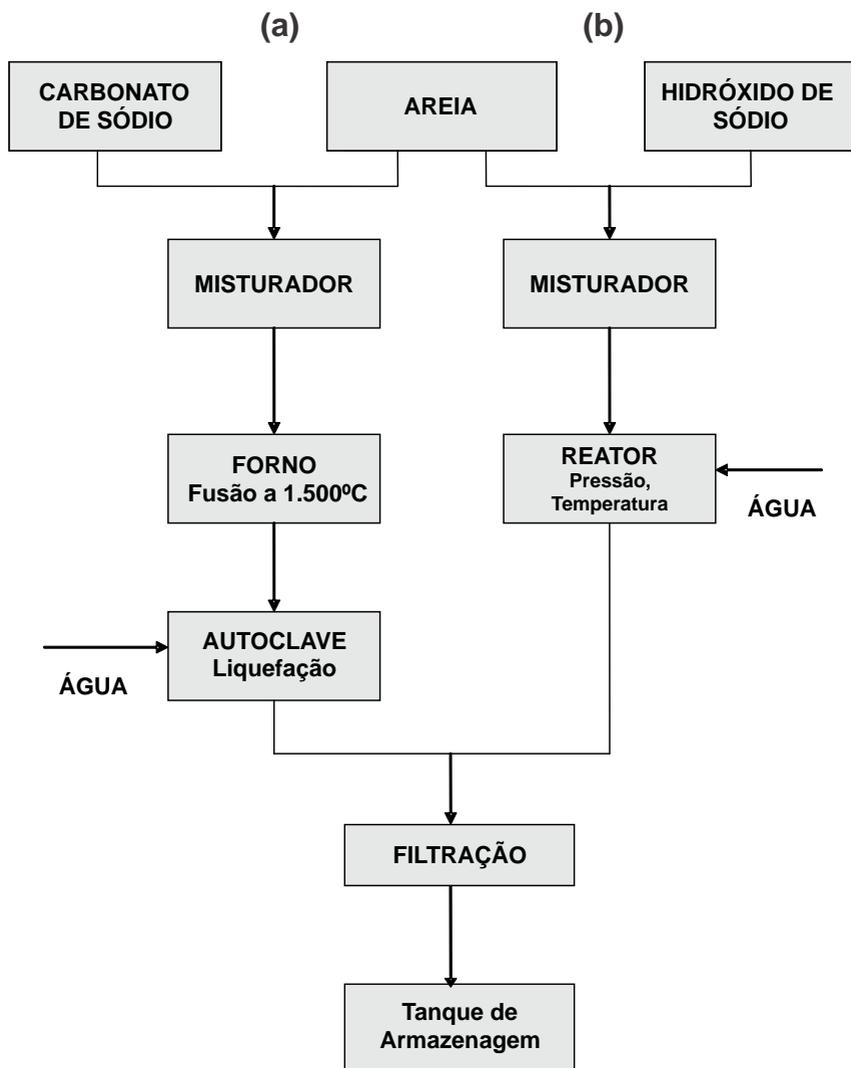
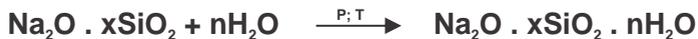


Fig. 1. Esquema simplificado da produção do silicato de sódio pelo processo de fusão (a) ou hidrotérmico (b).

Fonte: Fernandes (2009)³.

³ Informação verbal fornecida por S. R. Fernandes, em Mogi das Cruzes, SP, em julho de 2009.

As reações químicas que ocorrem em (a) são:



Onde: P, T = pressão e temperatura.

No processo hidrotérmico (reator), a soda cáustica e a areia são misturadas e colocadas no reator, onde a mistura é submetida à alta pressão e temperatura, ocorrendo a seguinte reação química:



No processo utilizando carbonato de sódio, normalmente faz-se a adição de hidróxido de sódio apenas com a finalidade de calibrar o teor de Na_2O no produto final. A filtração ocorre para eliminar a sílica existente na forma de colóides. Em ambos os processos é obtido um produto com as mesmas especificações físicas e químicas.

A fabricação do silicato de sódio tem um impacto insignificante no meio ambiente, pois o processo não gera subprodutos. No processo forma-se, adicionalmente, apenas gás carbônico. Os silicatos de sódio são derivados da sílica e compostos de sódio, retornando à natureza como tais. Considerando que eles estão entre os componentes químicos mais comuns da crosta terrestre, o potencial de danos ambientais pelo uso destes silicatos é mínimo.

7. O silicato de sódio e o desenvolvimento das plantas

Muitos ensaios com variadas fontes de silício demonstram incrementos de crescimento e produção da parte econômica de diversas culturas, mas com destaque para o arroz, por ser a planta mais estudada em relação à nutrição com esse elemento. Para experimentos em condições hidropônicas, Epstein (1994) e Epstein e Bloom (2006) recomendam que o silício seja incluído nas soluções nutritivas, rotineiramente, na forma de silicato de sódio, na concentração de 1mM. Nesse caso, o pH deve ser reduzido para evitar precipitação de outros nutrientes.

Em 1930, Arrhenius publicou artigo em que mostrava o aumento na produção de aveia com o uso do silicato de sódio. Na ocasião, o autor concluiu que esse aumento era devido às mudanças nas relações de solubilidade do fosfato presente no solo ou efeitos relacionados (ARRHENIUS, 1930).

Em trabalhos realizados na Índia, foram aplicados em arroz níveis crescentes de silicato de sódio via foliar (0, 100, 200 e 400 mg L⁻¹ de Si), duas vezes por semana, até o estágio de emborrachamento (final do ciclo vegetativo). A aplicação foliar de

400 ppm de Si aumentou significativamente o crescimento, o perfilhamento e a atividade fotossintética das plantas em relação ao tratamento controle e aos níveis mais baixos de silício aplicado (100 e 200 ppm). A incorporação de $^{14}\text{CO}_2$ na clorofila dobrou após uma hora de exposição à luz. Além disso, na dose mais alta de silício, o teor de clorofila total aumentou de 33,5 e 35,7 (testemunhas de duas variedades - Soorya e Suhasini, respectivamente) para 35,6 e 39,9 mg kg^{-1} de massa fresca foliar, principalmente em razão do aumento da clorofila b. Observou-se, também, aumento no teor de silício, passando de 1,2 / 1,3 para 1,9 / 2,0 g kg^{-1} nas duas variedades. Por outro lado, os níveis de carboidrato diminuíram nos colmos [13,0 / 13,8 para 9,6 / 12,1 g (100 g)^{-1} de tecido fresco] e nas folhas [5,8 / 7,3 para 4,8 / 5,5 g (100 g)^{-1} de tecido fresco], quando comparados às testemunhas (PAWAR; HEDGE, 1978; HEDGE; PAWAR, 1981).

Apesar das limitações inerentes ao uso de fontes salinas nos solos, pelo risco de se aumentar a salinidade, muitas pesquisas realizadas com a aplicação de silicato de sódio no substrato, visando avaliar o efeito do silício, mostram que essa fonte é eficaz em fornecer silício e aumentar o crescimento e produtividade, entre outros fatores.

A adição de silicato de sódio (500 mg kg^{-1} de SiO_2) ao solo aumentou a disponibilidade de silício, havendo incremento na absorção de silício e de produção em arroz (SUBRAMANIAN; GOPALSWAMY, 1990). Em experimento com vasos, Ma e Takahashi (1991) testaram o efeito da aplicação do silicato de sódio em arroz com ou sem inundação. Houve incremento significativo na matéria seca da parte aérea em ambos os sistemas de irrigação.

Wang e Chen (1996) estudaram o efeito do selênio em arroz e a suplementação conjunta de silicato de sódio ($80 \mu\text{g ml}^{-1}$) com selenito de sódio (0 a $0,6 \mu\text{g ml}^{-1}$), via radicular. A adição de silicato de sódio aumentou a altura das plantas, o teor de proteína solúvel e clorofila, além do ^{32}P absorvido e distribuído na parte aérea. O fornecimento do silicato de sódio promoveu a exportação de assimilados (^{14}C) das folhas e seu acúmulo no aparelho reprodutivo, nas fases de emborrachamento, grãos leitosos e pastosos.

Um trabalho conduzido na Índia estudou a eficiência de utilização de diferentes fontes de silício em arroz irrigado. Os tratamentos consistiram de três fontes de silício (silicato de sódio, sílica fina e palha de arroz), além da testemunha. O silicato de sódio proporcionou o máximo crescimento e produção de grãos (6.644 kg ha^{-1}), em relação às outras fontes (6.282 kg ha^{-1} para sílica fina e 6.113 kg ha^{-1} para palha de arroz). No caso do tratamento com silicato de sódio o crescimento foi inicialmente mais lento, aumentando nos estádios posteriores, principalmente a partir do florescimento. Por outro lado, houve tendência de redução nos teores de Ca, Fe e Mn nos estádios de perfilhamento e iniciação da panícula. Os autores creditaram o melhor desempenho do silicato de sódio à variabilidade na solubilidade e degradabilidade das fontes de silício (LAKSHMIKANTHAN et al., 2002).

Outro estudo, também realizado na Índia, mostrou resposta positiva do arroz ao silicato de sódio (0 e 100 kg ha^{-1}) nos componentes de produção. Houve um aumento significativo na produção de grãos e palha, força estrutural do colmo, número de espiguetas e de grãos cheios por panícula e peso de panícula

(SUNILKUMAR; GEETHAKUMARI, 2002). Do mesmo modo, pesquisa conduzida em condições hidropônicas com três variedades de arroz, utilizando silicato de sódio variando de 0 a 150 mg Si kg⁻¹ em solução, mostrou diferenças genotípicas quanto à absorção do elemento e ao nível ótimo no tecido vegetal para o crescimento. O silicato de sódio proporcionou aumento no crescimento da parte aérea e raízes até a dose de 75 mg kg⁻¹ de silício. A taxa de aumento na matéria seca das plantas foi diferenciada entre as variedades (GILL et al., 2007).

Lima Filho e Tsai (2007) obtiveram efeitos expressivos no crescimento e na produção do trigo e na produção da aveia branca, ao suplementar as plantas com silicato de sódio em solução nutritiva. As três cultivares de trigo estudadas apresentaram crescimento acentuado e significativo nos parâmetros matéria seca da parte aérea, espigas e grãos, aumento no número e na massa individual de grãos e no comprimento das espigas, esta última em apenas uma cultivar. Nas duas cultivares de aveia branca avaliadas, a adição de silício ao meio nutriente aumentou significativamente o número de grãos por planta e a produção.

Yan et al. (1996) conduziram estudo sobre os efeitos da aplicação combinada de fontes de silício, zinco e manganês no crescimento e na produção de trigo e milho. Apesar de a aplicação conjunta de zinco e manganês aumentar a produção de ambas as espécies, os melhores resultados foram obtidos com a adição ao solo de zinco, manganês e silício, este último na forma de metassilicato de sódio. Houve incremento no peso de 1.000 grãos, número de grãos por espiga e número de espigas por unidade de

área, tanto no trigo como no milho. As produtividades aumentaram significativamente em 11,9% no trigo e 15,4% no milho. Em experimentos com milho no campo, por dois anos consecutivos, Li et al. (1999) estudaram o efeito da aplicação de silício, na forma de silicato de sódio, sobre a produção e melhoria das condições nutricionais. O tratamento com o silicato aumentou a produtividade, pelo incremento no número de grãos por espiga e no peso de 1.000 grãos. Owino-Gerroh e Gascho (2004) também obtiveram aumentos na massa da parte aérea e raízes de milho, quando suplementados com silício na forma de silicato de sódio. Do mesmo modo, a aplicação basal de silicato de sódio em plântulas de cevada, colhidas 20 dias após a emergência, causou aumento significativo na altura, bem como na matéria seca da parte aérea e raízes (HUANG; SHEN, 2003).

Outras culturas também se mostram responsivas ao silicato de sódio quanto ao crescimento. Raleigh (1953) testou, nos Estados Unidos, a aplicação dos silicatos de sódio, potássio e cálcio em solos com níveis diferenciados de fósforo, cultivados com tomateiro. Os resultados foram variáveis nas diferentes regiões onde foram implantados os ensaios. O silicato de sódio foi sempre mais efetivo que o silicato de potássio no aumento do crescimento das plantas. Em solos com baixos níveis de fósforo, o silicato de cálcio foi tão eficiente quanto o silicato de sódio em alguns tratamentos.

Belyaev (1993) realizou uma série de ensaios em campo com girassol, tanto com silicato de potássio quanto com silicato de sódio, aplicados via solo. Ambos aumentaram, significativamente, o crescimento das plantas. Em trabalho utilizando fontes de P e

combinações com silicato de sódio (superfosfato simples - SSP; SSP + silicato de sódio com ou sem pirofosfato de sódio; fosfato diamônio - DAP com ou sem silicato de sódio, polifosfato de amônia e fosfato nítrico) em plantas de girassol, pesquisadores obtiveram a maior produção de matéria seca da parte aérea e absorção de P com DAP + silicato de sódio (SINGH et al., 1994).

Em girassol ornamental, a suplementação de silício foi estudada utilizando-se várias concentrações do elemento e fontes - silicato de potássio, cinza de casca de arroz e aplicações foliares de silicato de sódio. Observaram-se melhorias significativas em diversas características, como espessura e força dos ramos, diâmetro de flores e ramos, além de aumento na altura das plantas. O silicato de sódio ($100 \text{ mg L}^{-1} \text{ Si}$) aumentou em 0,8 cm o diâmetro das flores. A diminuição da transpiração, induzida pelo silício, pode ter contribuído para aumentar a pressão de turgor dentro das flores, resultando em expansão celular e, conseqüentemente, maior diâmetro floral. Aplicações foliares de 50, 100 e 150 mg L^{-1} de silício, na forma de silicato de sódio, aumentaram o diâmetro basal e apical do caule. Neste caso, a deposição de silício pode ter aumentado a espessura e a força mecânica do caule, além da diminuição da evapotranspiração aumentar a pressão de turgor celular. A aplicação de silicato de potássio no substrato atrasou o florescimento, ocorrendo deformação na cabeça das flores de algumas plantas. O mesmo não ocorreu com o uso foliar de silicato de sódio. Os autores concluíram que o melhor tratamento com a solução de silicato de sódio foi com a concentração de 100 mg L^{-1} de silício em aplicações semanais (KAMENIDOU et al., 2008).

Kamenidou et al. (2009) também estudaram o aumento na qualidade da flor de zínia (*Zinnia elegans*) suplementada com silício. Os autores aplicaram o elemento na forma de silicato de potássio incorporado no substrato, adicionado semanalmente por meio de irrigação e pulverização semanal com silicato de sódio. Entre as fontes de silicato de potássio e de sódio, apenas a aplicação foliar do silicato de sódio aumentou a resistência foliar das plantas, por meio da formação de uma película antitranspirante. A aplicação foliar do silicato de sódio também aumentou significativamente o diâmetro das flores em cerca de 30%.

Em hortaliças, mais especificamente em chicória, alface e nabo, a aplicação de 0,3% de silicato de sódio, via foliar, proporcionou efeitos positivos na produtividade (YANISHEVSKAYA; YAGODIN, 2000). Martinetti e Paganini (2004) estudaram diversos fertilizantes, minerais e orgânicos, em abobrinha, todos com uma adubação básica NPK. Cada tratamento foi combinado com três níveis de silicato de sódio, aplicado em cobertura. A suplementação de silicato de sódio aumentou significativamente a massa da matéria seca dos frutos, não influenciando outros parâmetros analisados - número, comprimento, diâmetro, massa fresca e seca de frutos e número de flores masculinas.

Dois cultivares de melão, cultivadas em sistema hidropônico com 1 mmol de silício na forma de silicato de sódio, apresentaram aumento na massa fresca de raízes e na relação raiz/parte aérea. Não houve efeito da suplementação de silício

sobre o crescimento da parte aérea. As plantas com a presença de silício apresentaram significativo aumento na produção, que foi antecipada, devido ao adiantamento no florescimento, aos nós frutíferos mais baixos e à diminuição no abortamento de frutos. O teor de clorofila aumentou significativamente nas duas cultivares e a concentração de silício também aumentou, tanto nas folhas como nas raízes. Por outro lado, houve redução na transpiração (LU; CAO, 2001).

Em condições de casa-de-vegetação, um solo com altos teores de Al foi submetido a cinco níveis de silicato de sódio, com quantidades equivalentes de gesso em todos os tratamentos, a fim de se evitar o efeito dispersante do sódio. Houve efeito positivo significativo na altura e altamente significativo na produção de matéria fresca e seca das plantas (MIRAMONTES-FLORES et al., 2004).

Lima Filho et al. (2005c) avaliaram a produção de grãos de soja nodulada ou não nodulada, com doses crescentes de silício, em condições hidropônicas. Não houve efeito da suplementação de silício na produção de grãos da soja não nodulada. Também não houve aumento no tamanho individual das sementes, tanto de plantas noduladas como de não noduladas. Por outro lado, ocorreu um aumento de 15% na matéria seca dos grãos de plantas noduladas. Houve, também, uma tendência de aumento nos teores foliares de fósforo, potássio, cálcio e enxofre, o que provavelmente contribuiu para o aumento na produção.

Lima Filho e Tsai (2006), estudando o efeito do silício em soja nodulada, verificaram que a adição de silicato de sódio ao

substrato (perlita) permitiu às plantas absorverem e translocarem quantidades crescentes do elemento para a parte aérea. Os teores foliares de silício variaram entre $5,2 \text{ mg kg}^{-1}$ na testemunha até $10,3 \text{ mg kg}^{-1}$ no tratamento com 50 mg L^{-1} de Si no substrato. No tratamento com 100 mg L^{-1} ocorreu uma redução no teor de Si foliar, provavelmente em virtude da polimerização do silício no substrato e consequente diminuição na absorção da molécula de ácido silícico pelas raízes de soja. A suplementação com silício proporcionou maior vigor no crescimento das plantas, com aumento na matéria seca da parte aérea, notadamente folhas, no período inicial do florescimento. A matéria seca das hastes foi semelhante entre os tratamentos, exceto para a testemunha, que foi significativamente menor. Por outro lado, não houve modificação no crescimento das raízes. A relação de massa entre a parte aérea e as raízes variou de 2,6 na testemunha até 3,4 no tratamento com nível mais elevado de silício.

8. O silicato de sódio e as interações nutricionais

As pesquisas envolvendo a absorção de silício e as interações nutricionais muitas vezes são feitas com o silicato de sódio adicionado ao substrato, para que haja a absorção radicular do ácido silícico. Mecfel et al. (2007) estudaram o efeito da fertilização com vários compostos silicatados (silicato de sódio, sílica gel e sílica pirogênica hidrofílica) na acumulação de silício em trigo. A microanálise por raios-X e a espectroscopia por absorção atômica mostraram que a deposição predominante ocorre nas células epidérmicas das folhas, especialmente nas paredes celulares. O silicato de sódio foi o composto fertilizante mais eficiente no aumento do teor de silício das plantas, seguido pela sílica gel e pelo dióxido de silício sintético (sílica pirogênica), sendo correlacionado com a facilidade de formação de ácido ortossilícico a partir destes compostos.

Rains et al. (2006) estudaram a absorção do silício em trigo (*Triticum aestivum* L.), pois esta espécie acumula altas quantidades do elemento, similarmente ao arroz. Os autores forneceram às plantas silicato de sódio como fonte do elemento. A absorção do

silício pelas plantas de trigo mostrou que a sua concentração na planta obedece à cinética de Michaelis-Menten numa concentração externa de silício acima de 1,0 mM. A absorção do silício sofre interferência de inibidores metabólicos, não sendo afetada por fosfato, havendo competição com o germânio.

A necrose da bráctea em bico-de-papagaio (*Euphorbia pulcherrima* Willd) é uma desordem fisiológica associada a baixas concentrações de cálcio e alta relação K/Ca nos tecidos das brácteas marginais. Aplicações foliares de silicato de sódio (3,56; 5,34 e 7,12 mM de Na_2SiO_3) foram tão efetivas em proteger as plantas contra a necrose quanto a aplicação de 9,98 mM de CaCl_2 , apesar de o silício via foliar não ter nenhum efeito sobre as concentrações de cálcio e potássio nas brácteas, além da necrose não estar associada com a composição dos demais macronutrientes e micronutrientes do órgão afetado (McAVOY; BIBLE, 1996).

A capacidade de silicatos solúveis disponibilizar parcialmente o fósforo fixado no solo tem sido demonstrada ao longo dos anos com vários trabalhos. Em Rothamsted Station, Harpenden, Inglaterra, experimentos de longa duração foram iniciados em 1862 com silicato de sódio e cereais, principalmente cevada, perdurando até os dias atuais. O início dos testes com silicato de sódio em Rothamsted foi introduzido, originalmente, para se verificar o efeito do silício sobre a resistência da palha de cevada. Observou-se, ao longo dos anos, que o silicato aumentou a produtividade das parcelas não adubadas com fósforo. Este incremento foi ligado à maior disponibilidade do fósforo provocada pela adubação com

silicato de sódio (450 kg ha^{-1}). Os incrementos na produção de cevada nos períodos de 1862-1891, 1932-1961 e 1964-1966 foram de 27,6%, 16,8% e 34%, respectivamente (WILD, 1988; ROTHAMSTED RESEARCH, 2006).

Experimentos no campo com cevada e silicato de sódio aplicado via solo, reportados por Fisher (1929), mostravam uma maior absorção de fósforo, mesmo não havendo adubação fosfatada nas parcelas tratadas com o silicato. As plantas com silicato apresentaram maior produção de palha e grãos. Hance (1933) também verificou que o silicato de sódio aplicado ao solo era eficiente em reduzir a fixação de fósforo em solos do Havaí, aumentando a assimilação deste nutriente pela cana-de-açúcar. Resultados análogos foram observados por Laws (1951), cuja aplicação de silicato de sódio no solo aumentou a extração de fósforo por diferentes soluções extratoras. Além disso, ocorreu aumento nos teores de nitrogênio e potássio e diminuição no de cálcio nas plantas.

Sadanandan e Varghese (1969) estudaram a influência do silício sobre a absorção de nutrientes em arroz, nas fases de perfilhamento, florescimento e maturação dos grãos. Houve correlação positiva entre silício, aplicado ao solo na forma de silicato de sódio, e nitrogênio na palha do arroz, nas fases de perfilhamento e maturação, e correlação negativa no florescimento. Os autores atribuíram tal comportamento ao fato de o silício ser ativo na translocação do nitrogênio das partes vegetativas para a panícula, no início da fase reprodutiva. A concentração de fósforo na palha também foi positivamente correlacionada com os níveis de silício.

Trabalho de Singh e Sarkar (1992) mostrou que a adubação com silicato de sódio em arroz aumentou a absorção de fósforo em tratamentos sem a suplementação com fosfato. Em milho, a adição de silicato de sódio diminuiu, significativamente, a adsorção de fósforo no solo. Os teores de silício e fósforo aumentaram na parte aérea e nas raízes com a aplicação do silicato de sódio, não ocorrendo o mesmo com a aplicação isolada de fósforo (OWINOGGEROH; GASCHO, 2004).

A adição de silício ($0,47 \text{ mg g}^{-1}$ de solo deficiente em fósforo), na forma de silicato de sódio, aumentou o crescimento e praticamente dobrou a concentração de nitrogênio na parte aérea, enquanto ocorreu diminuição na absorção de manganês, quando comparado à testemunha. Mesmo não havendo incremento no teor de fósforo, a relação P/Mn aumentou (MA; TAKAHASHI, 1991). Lima Filho et al. (2003) obtiveram aumentos significativos nos teores de nitrogênio, fósforo e potássio em soja nodulada suplementada com silício e cultivada em condições hidropônicas.

Guandu e leucena não noduladas, também cultivadas em solução nutritiva, apresentaram aumento nos teores foliares de nitrogênio em virtude do acréscimo de silício ao substrato. Em guandu, por exemplo, plantas suplementadas com silicato de sódio tiveram uma redução de aproximadamente 18% no teor de fenóis totais. Os autores relacionaram, como uma das prováveis causas dessa queda, o aumento de 24% no teor de nitrogênio, ocasionado pela suplementação com silicato (LIMA FILHO; ABDALLA, 2005). Como o silício pode aumentar a produção de fotoassimilados, devido ao incremento na taxa fotossintética, há

um aumento de substrato para a incorporação do nitrogênio nos esqueletos carbônicos (TAKAHASHI, 1995; EPSTEIN, 1995).

Muitos experimentos com silício e metais pesados, principalmente alumínio e manganês, já foram realizados, demonstrando o efeito mitigador do silício sobre os efeitos deletérios que estes elementos podem ter sobre as plantas. A fitotoxicidade destes elementos é causada, principalmente, por processos de acidificação, mobilizando estes elementos nos solos minerais. Grenda e Badora (2001) demonstraram que a adição ao substrato, tanto de silicato, na forma de metassilicato de sódio, como de matéria orgânica, na forma de humato de sódio, pode diminuir as toxicidades causadas por alumínio e manganês. A aplicação de ambos os produtos influenciou negativamente os teores das formas móveis desses metais no solo, bem como a concentração nos tecidos vegetais de trigo.

Huang e Shen (2003) estudaram o papel do silício na redução da toxidez de alumínio em plântulas de cevada e os possíveis mecanismos envolvidos. A aplicação no solo de silicato de sódio, com diferentes doses de alumínio (relação Si/Al de 0,0; 0,5 e 1,0), causou acúmulo deste elemento nas raízes e facilitou o transporte de fósforo para a parte aérea. De acordo com os autores, o silício diminuiu a toxicidade do alumínio na cevada pela formação na solução do solo de íons hidroxialuminossilicatos, menos tóxicos, reduzindo, dessa maneira, a concentração do metal na planta e aumentando o transporte de fósforo para a parte aérea.

A suplementação de silício, na forma de silicato de sódio, em pepineiro cultivado em condições hidropônicas tornou o manganês, com concentrações elevadas no substrato, menos disponível, portanto menos tóxico para as plantas. Estas, quando não tratadas com silício, apresentavam maiores concentrações de manganês no fluido de lavagem intercelular, quando comparadas com aquelas suplementadas com silicato de sódio. As plantas supridas com silício apresentavam menos manganês localizado no simplasto (< 10%) e maior proporção do manganês ligado à parede celular (> 90%). Nas plantas não tratadas com silício a proporção foi de 50% em cada compartimento. Os resultados mostram que o silício pode mediar a tolerância da planta ao manganês por meio da forte ligação do metal às paredes celulares e uma diminuição na concentração dentro do simplasto (ROGALLA; ROMHELD, 2002).

Efeitos deletérios de outros metais pesados também podem ser minimizados com a presença de silício solúvel na solução do solo. A adição de nitrato de cádmio na solução nutritiva diminuiu o crescimento das raízes, bem como a extensibilidade total das paredes das células radiculares de milho. Por outro lado, a suplementação de silício na forma de silicato de sódio, em comparação com o controle, aumentou em cerca de 15% o crescimento das raízes, além do incremento significativo na extensibilidade radicular. A adição de silício, em plantas tratadas com cádmio, diminuiu os efeitos causados pelo metal pesado, aumentando o crescimento, a plasticidade e a elasticidade do órgão subterrâneo (LUX et al., 2008).

Xu et al. (2007) investigaram o efeito de diversos fertilizantes minerais, incluindo cloreto de potássio, nitrato de cálcio, sulfato de sódio e silicato de sódio, sobre a disponibilidade do cromo no solo e sua absorção pelo repolho [*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.)]. Os fertilizantes testados promoveram a transformação do cromato (Cr^{VI}) adicionado ao substrato em cromo orgânico no solo, aumentando a disponibilidade do metal pesado significativamente. Entretanto, a absorção do cromo pela cultura foi fortemente inibida pelo silicato de sódio, apesar da maior disponibilidade do metal no solo.

Em leguminosas, a fixação simbiótica do nitrogênio é dependente de um suprimento adequado de macro e micronutrientes (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Em relação ao efeito da nutrição silicatada sobre a simbiose *Bradyrhizobium japonicum* - soja, os poucos trabalhos realizados evidenciam a importância que este elemento pode ter no aumento da fixação do nitrogênio pelo rizóbio. Nelwamondo e Dakora (1999) estudaram a resposta simbiótica do caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) à nutrição do silício, em condições de casa de vegetação, utilizando substrato hidropônico e areia. Os autores verificaram que a suplementação com silício, na forma de ácido silícico, aumentou a produção de matéria seca da parte aérea, além de promover o aumento no número e na massa dos nódulos.

Estudando a influência do silício na nodulação da soja, Lima Filho et al. (2005c) também concluíram que o silício, adicionado à solução nutritiva na forma de metassilicato de sódio, pode aumentar significativamente a produção e a atividade dos nódulos

simbiontes. Nos ensaios, ocorreu aumento no número, na massa e na atividade da nitrogenase dos nódulos e no teor de nitrogênio das folhas, não havendo variação significativa na produção de matéria seca da parte aérea.

Lima Filho e Tsai (2006), utilizando perlita como substrato, obtiveram resultados positivos quanto à influência do silício na produção de nódulos radiculares. A resposta simbiótica à adição crescente de metassilicato de sódio (0, 10, 25, 50 e 100 mg kg⁻¹ de substrato) à perlita foi positiva. O número de nódulos aumentou significativamente nos dois últimos tratamentos, ao passo que a massa de nódulos por planta aumentou linearmente, particularmente para 100 mg kg⁻¹. A atividade da nitrogenase, por planta e por unidade de massa nodular, diminuiu progressivamente com o aumento da disponibilidade de silício no substrato. Do mesmo modo, o tamanho médio dos nódulos, avaliado por meio da massa individual dos mesmos, diminuiu acentuadamente nos dois tratamentos com teores mais altos de silício. Assim, verificou-se que ocorreu maior atividade da nitrogenase nos nódulos maiores.

Como o silício pode aumentar os mecanismos de defesa da planta, provavelmente por meio da biossíntese de isoflavonóides, é possível que a nutrição silicatada possa induzir a síntese de flavonóides indutores de nod-genes, que são as moléculas sinalizadoras envolvidas nos estágios iniciais da formação dos nódulos (DAKORA, 2005).

9. O silicato de sódio e as doenças

Como indutor de resistência sistêmica a doenças, o silício age de maneira inespecífica, numa ampla gama de patossistemas não relacionados. Nesse sentido, o silicato de sódio é uma fonte que permite o fornecimento do silício via radicular ou foliar, permitindo à planta combater o patógeno com mais eficiência. Compostos naturais, como o silicato de sódio, são uma boa alternativa ou complemento para fungicidas químicos, principalmente em culturas com crescimento contínuo, cujas folhas novas não pulverizadas tornam-se continuamente suscetíveis à infecção de fungos patogênicos.

A aplicação de 93,5 mg de Si dm⁻³, na forma de metassilicato de sódio, em solo intemperizado da África, dobrou a concentração de silício no arroz e reduziu significativamente a severidade da escaldadura das folhas, brusone e mancha-dos-grãos (WINSLOW, 1992).

Gangopadhyay (1979) relacionou os teores foliares de nitrogênio com silício e fenóis. Os níveis de SiO₂ foram correlacionados negativamente com a incidência de mancha

parda (*Helminthosporium oryzae*) e com os teores de nitrogênio, ou seja, níveis elevados desse macronutriente induziram menor absorção de silício, menor síntese de fenóis e maior incidência da doença.

Lima Filho e Abdalla (2005) estudaram a relação entre a suplementação de silício, na forma de silicato de sódio, em solução nutritiva, e a síntese de compostos fenólicos, incluindo teores de taninos totais em guandu e leucena. Nesta última, as plantas responderam à suplementação com silício absorvendo e translocando para as folhas 72% mais silício do que o tratamento controle. Em guandu o aumento foi menor, alcançando um percentual médio de 30%. No guandu houve um decréscimo significativo no teor de fenóis totais e taninos com a suplementação com silício. O mesmo não ocorreu com a leucena. Segundo os autores, uma causa provável para esta diminuição foi a indução no aumento da absorção do nitrogênio pela adição de silício, em torno de 24%. A fertilização nitrogenada pode causar uma diminuição no nível de fenóis e taninos. Em leucena a suplementação com silício também ocasionou aumento de 11% no teor foliar de nitrogênio, porém bem abaixo do ocorrido com o guandu. São escassos os trabalhos envolvendo a interação N x Si. Referências mais comuns envolvem a ação dos níveis de nitrogênio sobre a absorção e acumulação de silício, mas não o contrário, ou seja, o efeito do silício na absorção de nitrogênio. Lima (1998) obteve aumento no teor foliar de nitrogênio de até 47% em soja nodulada, cultivada em solução nutritiva, quando se adicionou silício ao meio nutriente, em uma concentração de 3,57 mM de metassilicato de sódio.

Em uma série de ensaios na década de 80, Piorr (1986) estudou a possibilidade de se utilizar a aplicação foliar de silicato de sódio, com o objetivo de reduzir a intensidade de doenças em cereais. Os resultados foram comparados com fungicidas (captafol + triadimefon ou propiconazol). Testes complementares foram feitos em um sistema orgânico. Aplicações foliares de silicato de sódio a 2% reduziram significativamente a escaldadura (*Rhynchosporium secalis*) em centeio e cevada, oídio (*Erysiphe graminis*) em trigo e cevada e a ferrugem da folha (*Puccinia recondida*) em trigo. Apesar de as reduções nas intensidades das doenças terem sido mais expressivas nos tratamentos com os fungicidas, a produção de grãos foi similar entre o tratamento com silicato de sódio e aqueles com os fungicidas

Aplicação de Na_2SiO_3 ou sua embebição em sementes de arroz diminuiu a incidência de mancha das glumas (*Pyricularia oryzae*) de 32% para 8% (aplicação em cobertura) ou 14% (tratamento das sementes) em cultivar tolerante, mostrando altos níveis de fenóis. Da mesma maneira, a aplicação do silicato de sódio no substrato, em cultivar suscetível, com baixos níveis de fenóis, diminuiu a infecção de 47% para 26% (ALESHIN et al., 1986). Yamauchi e Winslow (1987) também obtiveram diminuição na incidência e severidade da *P. oryzae* em diversas cultivares de arroz, aplicando 400 kg ha^{-1} de silicato de sódio.

Hooda e Srivastava (1996) testaram o efeito de fontes de silício, incluindo casca queimada de arroz e silicato de sódio (125 e 250 kg ha^{-1} em cobertura e aplicação foliar a 1%) sobre o desenvolvimento da bruzone (*P. oryzae* / *Magnaporthe grisea*) em

arroz. Ambas as fontes e modos de aplicação reduziram a incidência da doença. No estudo, a casca queimada de arroz na dose intermediária e a aplicação foliar do silicato de sódio, foram os mais efetivos e economicamente viáveis para as condições locais. Além de diminuir a incidência da doença, todos os tratamentos aumentaram os níveis de celulose, hemicelulose, sílica, proteína total, fenóis totais, peso de 1.000 grãos e produtividade do arroz.

A resistência do arroz à queima-das-bainhas pode ser aumentada com o emprego do silício como fertilizante. Assim, Zhang et al. (2008) realizaram ensaios com duas cultivares de arroz com diferentes graus de resistência ao fungo *Rhizoctonia solani* - resistente e suscetível. Na cultivar suscetível, a aplicação de silicato de sódio, em condições hidropônicas, diminuiu significativamente a taxa e o índice da doença, em relação àquelas plantas que não receberam silício. Após a inoculação com o fungo as folhas das plantas apresentaram decréscimo significativo no teor de clorofila, na taxa fotossintética líquida e na condutância estomatal, ao passo que a concentração de CO₂ intercelular aumentou. Ao fornecer silício às plantas de arroz na forma de silicato de sódio, o teor de clorofila, fotossíntese líquida e condutância estomatal aumentaram, enquanto o nível de CO₂ diminuiu. As plantas com suplementação de silício apresentaram menor elevação nos níveis de malonaldeído (MDA) em ambas as cultivares infectadas por *R. Solani*, ou seja, reduziu o grau de peroxidação lipídica foliar. Dessa forma, ocorreu aumento das plantas de arroz à queima-das-bainhas. MDA é um subproduto da quebra de ácidos graxos poliinsaturados, indicando a ocorrência

de peroxidação lipídica. Em condições de estresse, as espécies ativas de oxigênio podem se acumular nos tecidos, resultando na alteração da atividade de enzimas antioxidantes e da produção de MDA (LIMA FILHO et al., 2005a).

Em estudo para avaliar a eficiência de diversos compostos químicos na diminuição da incidência da brusone (*M. grisea*) em plântulas de arroz, Senapoty et al. (2000a) aplicaram cloreto de cádmio, cloreto férrico, molibdato de sódio, sulfato de zinco e silicato de sódio a 10^{-4} M, bem como sulfato de lítio, sulfato de magnésio, cloreto de potássio e fluoreto de sódio a 10^{-3} M, aplicados no tratamento das sementes ou via foliar. Todos os produtos diminuíram o índice da doença significativamente, em relação ao controle, independentemente do método aplicado. Entretanto, o silicato de sódio destacou-se em relação aos demais, nos dois tipos de aplicação. No tratamento úmido das sementes com o silicato, o índice da doença ficou em 19,3%, enquanto a pulverização foliar diminuiu para 20%. Quando testados in vitro, nenhum produto apresentou fungitoxicidade em suas concentrações efetivas aplicadas nas plantas (SENAPOTY et al., 2000b).

Foi realizado um estudo para testar o efeito de solubilizadores de sílica do solo (piridina N-óxido, PNO e 4-morpholino piridina N-óxido, MNO) e de metassilicato de sódio, na capacidade de aumentar o teor de silício em plantas de arroz e a resistência a pragas e doenças. Foram aplicadas duas doses de cada produto (0 e 150 mg kg⁻¹) a cada 15 dias, durante todo o período de crescimento das plantas. As plantas que receberam

PNO, MNO ou silicato de sódio ficaram fenotipicamente mais resistentes em relação às plantas controle. Houve um aumento significativo no comprimento e na largura das folhas, particularmente com MNO e silicato de sódio. Em plantas controle, infectadas com brusone (*Pyricularia grisea*), ocorreram quedas marcantes na quantidade de clorofila produzida, valores SPAD (medidor de clorofila) e na atividade do Fotossistema 2 da fotossíntese. Entretanto, quando suplementadas com os solubilizadores de silício ou silicato de sódio, a diminuição nestas características foram muito pequenas. O aumento na disponibilidade de silício levou, também, a uma redução no dano causado pela lagarta-amarela-do-colmo (*Scirpophaga incertulas*). As folhas tratadas com silicato de sódio, MNO e PNO apresentaram aumento no teor de Si, localizando-se na bainha do feixe celular (endoderme), particularmente nas paredes primária e secundária. O aumento na resistência à brusone provavelmente está associado à fortificação da parede celular, enquanto o menor ataque da broca pode estar ligado à menor preferência e digestibilidade dos tecidos do arroz (RANGANATHAN et al., 2006).

A aplicação de silicato de sódio, nas doses de 1,25 e 2,5 g kg⁻¹ solo, em trigo cultivado em vasos, aumentou o teor foliar de silício de 4 mg kg⁻¹ para 19 e 20 mg kg⁻¹, respectivamente, 16 dias após a emergência. A incidência de oídio, previamente inoculado, diminuiu 28% e 13% em relação ao controle, respectivamente (LEUSCH; BUCHENAUER, 1988).

Rodgers-Gray e Shaw (2004) testaram o efeito da aplicação basal do metassilicato de sódio em areia + vermiculita, cultivada

com trigo, sobre a incidência de oídio (*Blumeria graminis*), ferrugem da folha (*Puccinia recondida*), mancha da folha (*Phaeospharia nodorum*), septoriose foliar (*Mycosphaerella graminicola*) e mancha ocular (*Ocumacula yallundae*). Sob alta pressão das doenças ocorreu redução significativa nos sintomas com a aplicação de 100 mg L⁻¹ de silício, indicando a indução do aumento de resistência das plantas aos patógenos testados.

Diversas combinações do silicato de sódio com outros elementos têm sido propostas, patenteadas e estudadas, objetivando melhorar o desempenho das plantas, tanto no crescimento como no combate a estresses (MASUDA, 1991; VIAZZO, 2001; MATYCHENKOV, 2008). Boff et al. (1999) obtiveram maior sobrevivência e maior número de plântulas de cebola capazes de serem transplantadas, com uma mistura de produtos não tóxicos, incluindo silicato de sódio, quando comparada com o tratamento padrão de fungicida para a podridão da cebola (*Botrytis squamosa*).

Em videira, a utilização de silicato de sódio, isolado ou em misturas com outros produtos, tem proporcionado excelentes resultados no combate ao oídio (*Uncinula necator*) (HOFMANN, 1997; YILDIRIM; IRSHAD, 2002), particularmente no manejo orgânico (REYNOLDS et al., 2004). Na produção orgânica da maçã, o silicato de sódio é utilizado no manejo fitossanitário da cultura (McCOY, 2007).

Ponti et al. (1993) testaram a eficiência de diversos fungicidas e compostos naturais contra a estenfiliose ou mancha

marrom (*Stemphylium vesicarium*) em pomares de pereira por 5 anos. Os tratamentos foram aplicados entre o final do florescimento e a colheita, em intervalos que variaram de 5 a 18 dias, de acordo com as características dos produtos e condições ambientais. Os compostos naturais testados foram: silicato de sódio, fosfato de potássio, nitrato de potássio, cloreto de cálcio, sulfato de magnésio, bentonita + cobre, sal de cálcio e potássio, própolis e *Trichoderma* sp. Entre estes, apenas o silicato de sódio e bentonita + cobre resultaram em um bom controle da doença, sendo que os demais produtos foram ineficientes.

Mangueiras foram pulverizadas durante 5 meses, a cada 15 dias, com diferentes fórmulas de fertilizantes foliares, incluindo metassilicato de sódio (0,1%) isolado ou em conjunto com dois tipos de formulações de nutrientes ou com mel (2%). A aplicação conjunta do silicato de sódio e uma das formulações de nutrientes propiciou menor severidade de fusariose (*Fusarium subglutinans*), fungo causador da malformação da mangueira (DONALD et al., 2002).

Botelho et al. (2005) avaliaram a intensidade de cercosporiose em cafeeiros submetidos a níveis crescentes de silicato de sódio no substrato, nas doses 0; 0,32; 0,64 e 1,26 g de SiO₂ por quilograma de substrato. Foram realizadas cinco avaliações quinzenais, considerando-se o número de plantas doentes, o número de folhas lesionadas por planta, o número de lesões por folha e o número total de lesões por planta. Essas avaliações foram utilizadas para construir a área abaixo da curva de progresso da doença, que representa a severidade da doença

em função do tempo. A menor área abaixo da curva de progresso do total de lesões foi obtida com a dose de $0,84 \text{ g kg}^{-1}$ de silicato de sódio. Observou-se decréscimo linear para a área abaixo da curva de progresso do número de plantas doentes e aumento na concentração de lignina nas folhas até a dose de $0,52 \text{ g kg}^{-1}$ de silicato de sódio, enquanto no caule houve acúmulo de SiO_2 até $0,53 \text{ g kg}^{-1}$.

A utilização de silicatos solúveis tem grande potencial para ser utilizada na diminuição da incidência de ramulose (*Colletotrichum gossypii*) em algodoeiro, como constatado por Barbosa et al. (2005), onde plantas de algodão submetidas a níveis crescentes de silicato de sódio (0; 0,16 e 0,32 g de Si kg^{-1} de solo), em duas épocas de aplicação (cinco e dez dias antes da inoculação), apresentaram diferenças significativas no índice de doença e na área abaixo da curva de progresso da doença, em relação à testemunha, sem aplicação de silicato.

Pinheiro et al. (2005) avaliaram o efeito da aplicação de fungicidas sistêmicos e protetores, com ou sem associação com silicato de sódio, além de silicato de sódio aplicado isoladamente no controle da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*). Em relação à redução na intensidade da doença, todos os tratamentos diferiram da testemunha.

Em feijoeiro, a aplicação de silicato de sódio via foliar pode reduzir a incidência de antracnose (*Cercospora coffeicola*), conforme constatado por Moraes et al. (2006). A aplicação do silicato de sódio (com o pH da suspensão reduzido para 5,0) sobre

as folhas de feijão reduziu a área abaixo da curva de progressão da severidade da doença em 62,4%, em relação ao controle. Comparando-se com a aplicação de silicato de cálcio, via solo, a pulverização com a solução de silicato de sódio proporcionou a maior duração de área foliar sadia, semelhante à testemunha sem inoculação do patógeno. Na microanálise de raios-X, as plantas tratadas com silicato de sódio via foliar destacaram-se com o maior pico de silício. De acordo com os autores, a deposição de silício nas folhas proporcionou redução na extensão das lesões e menor severidade.

Várias pesquisas utilizam o meloeiro como planta teste em ensaios com silicato e doenças, especialmente oídio. Muitos desses trabalhos utilizam o silicato de sódio como fonte de silício. Em casa de vegetação e em condições de campo, Casulli et al. (2002) testaram a eficiência de vários produtos naturais. Entre outros, a aplicação foliar de silicato de sódio (0,5%) mais óleo mineral (1%) diminuiu significativamente a severidade de oídio (*Sphaerotheca fuliginea* e *Uncinula necator*) em abobrinha e melão.

No início do século 20 vários trabalhos já demonstravam que a imersão de ovos frescos, em solução de silicato de sódio, podia preservar as propriedades organolépticas originais dos ovos por vários meses, sem refrigeração, por formar uma película protetora impermeável aos microrganismos (HENDRICK, 1907; BERGER, 1910; BARTLETT, 1912).

De modo similar, efeitos antifúngicos de amplo espectro do silício também podem ser observados em frutos armazenados.

O tratamento pós-colheita com silício mostra-se efetivo ao inibir o crescimento de patógenos, bem como em induzir resistência a doenças, controlando a deterioração e mantendo a qualidade do fruto. Trabalhos mostram que o silicato de sódio apresenta grande potencial comercial como um produto que atrasa a deterioração de frutos colhidos, tendo a resistência induzida como um importante mecanismo de controle de doença em melão pós-colheita. Assim, avaliou-se a deterioração em melões armazenados, submetidos à imersão com níveis crescentes de solução de silicato de sódio (0 a 200 mM L⁻¹). O silicato de sódio inibiu o crescimento de *Trichothecium roseum*, tanto em testes in vitro como in vivo. As atividades das enzimas peroxidase e fenilalanina amônia-liase aumentaram nos frutos tratados com o silicato, enquanto a respiração dos frutos diminuiu. Na dose mais elevada, o silicato de sódio causou injúrias no melão. Análises de microscopia eletrônica de varredura e por dispersão de energia por raios-X mostraram que a superfície dos melões tratados apresentava uma característica mais suave e nível mais alto de silício, especialmente nos estômatos e ao longo da junção entre o exocarpo e o mesocarpo (GUO et al., 2003a,b; 2007).

Outros fungos que também causam a deterioração de frutos armazenados de melão podem ser combatidos eficazmente com a imersão deles em solução de silicato de sódio. O crescimento micelial de *Fusarium semitectum*, *Alternaria alternata*, além do próprio *Trichothecium roseum*, foi significativamente reduzido com esse tratamento, principalmente na concentração de 100 mM. A proteção conferida pelo silício foi correlacionada com a ativação de

duas famílias de enzimas ligadas às defesas da planta, peroxidase e quitinase. A peroxidase contribui com o reforço da parede celular e está envolvida nas etapas finais da biossíntese da lignina e nos cruzamentos oxidativos das proteínas da parede celular. A quitinase é uma das proteínas relacionadas à patogênese em muitas plantas. Esta enzima hidrolisa a parede celular de muitos fungos patogênicos (KOMBRINK; SOMSSICH, 1995; SHEWRY; LUCAS, 1997). Para a infecção de *T. roseum* nos frutos armazenados, também em melão, por exemplo, o aumento nas atividades enzimáticas de duas famílias de enzimas relacionadas aos mecanismos de indução de defesa, peroxidase e quitinase, foi 2 a 2,4 vezes superior, dependendo da cultivar, mantendo-se elevadas por até 10 dias em temperatura ambiente (BI et al., 2006).

Plântulas de melão suplementadas com silicato de sódio apresentaram maior atividade de peroxidase e -1,3-glicosidase após infecção com oídio (*Spharotheca cucurbitae*). Como resultado, a severidade da doença diminuiu significativamente. Análises por microscopia eletrônica revelaram aumento de silício nos estômatos e epiderme (GUO et al., 2005 a,b).

A aplicação foliar de silicato de sódio em plântulas de gengibre (*Zingiber officinale*) aumentou as atividades das enzimas superóxido dismutase, peroxidase, catalase e fenilalanina amônia-liase. No estudo, a concentração de silício entre 500 e 1.000 mg L⁻¹ proporcionou efeitos desejáveis, aumentando a habilidade antioxidante das folhas e as atividades de defesa da planta. (HUANG et al., 2007).

10. O silicato de sódio e as pragas

Trigo suplementado com silício, via solo ou foliar, pode apresentar maior resistência a afídeos, como constatado por Liang et al. (1999) em aplicação de silicato de sódio no substrato. O uso de silício em plantas de trigo pode conferir maior resistência ao pulgão verde (*Schizaphis graminum*), uma das principais pragas dessa cultura, como constatado por Basagli et al. (2003). Os autores forneceram silicato de sódio via foliar (0,4%), em 6 aplicações a cada 5 dias a partir da emergência, para plantas de trigo cultivadas em condições de casa de vegetação. A aplicação de silicato de sódio reduziu a preferência, longevidade e a produção de ninfas de pulgão verde. De acordo com os autores, o uso do silicato pode minimizar os problemas causados por esta praga, fornecendo um grau moderado de resistência, mas com a vantagem de ser facilmente integrado a outras táticas de manejo. A aplicação foliar do silicato de sódio afetou a preferência alimentar do afídio, aumentando a resistência do trigo. Isso afetou parâmetros biológicos do inseto, tais como longevidade e produção de ninfas. Assim, ocorreu uma redução no potencial reprodutivo de fêmeas, portanto reduzindo a densidade populacional e, conseqüentemente, danos e perdas na produção.

Goussain et al. (2005) avaliaram o efeito do silício via solo, foliar (silicato de sódio) e solo + foliar sobre o pulgão verde em trigo. Foram avaliados os seguintes parâmetros biológicos: duração do período pré-reprodutivo, reprodutivo e pós-reprodutivo, bem como fecundidade e longevidade. O comportamento de prova foi investigado utilizando-se as técnicas “Electrical Penetration Graphs” (EPG) e “honeydew clock”. Plantas tratadas com silício, independentemente do modo de aplicação, mostraram efeito adverso sobre o desenvolvimento desse pulgão. A penetração do estilete não foi afetada pelos tratamentos com silício, demonstrando ausência de barreira. Para os autores, mudanças químicas e indução de resistência estão possivelmente envolvidas na diminuição do desempenho desse afídeo. Isso sugere que tecidos não floemáticos e a qualidade da solução do floema foram modificados pela aplicação de silício, afetando o desenvolvimento reprodutivo e a longevidade desta importante praga.

Moraes et al. (2004) estudaram a interação tritrófica: trigo, pulgão-verde e seus inimigos-chaves naturais *Chrysoperla externa* (Hagen) e *Aphidius colemani* Viereck, em plantas com ou sem adubação silicatada, incluindo fertilização foliar com solução de silicato de sódio a 1%. Verificou-se que a aplicação de silício aumentou o grau de resistência das plantas de trigo, diminuindo a preferência do pulgão-verde em relação à testemunha. Conforme os autores, o resultado pode estar relacionado à barreira mecânica proporcionada pela deposição de sílica na parede celular, o que dificultaria a penetração do estilete no tecido da

planta, como também ao aumento na síntese de compostos de defesa da planta. Entretanto, não foi observado nenhum efeito indireto da aplicação de silício nas características biológicas tanto do predador como do parasitóide.

Hanisch (1981) testou a aplicação foliar de silicato de sódio (0,05%, 1%, 2% e 4%), tanto em casa de vegetação como em condições de campo, com a finalidade de induzir a resistência do trigo a duas espécies de afídeos: *Metopolophium dirhodum* e *Sitobion avenae*. O silicato de sódio teve um efeito negativo sobre *S. avenae* em todos os experimentos de campo, sendo menos pronunciado em *M. dirhodum*. Quanto maior a dose de nitrogênio fornecido às plantas, maior o favorecimento no crescimento da população dos afídeos. Nessas condições, foram obtidos os melhores resultados com o silicato, contrapondo os efeitos positivos da fertilização nitrogenada sobre os pulgões. O número de tricomas foliares na epiderme contendo silício, em plantas tratadas, aumentou 70% quando comparadas com aquelas não suplementadas com silicato de sódio.

Goussain et al. (2002) mostraram que o aumento no teor de silício nas folhas de milho pode dificultar a alimentação de lagartas-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), causando aumento de mortalidade e canibalismo. Os autores avaliaram o desenvolvimento de lagartas alimentadas com folhas de milho retiradas de plantas tratadas com silício, tendo como fonte o silicato de sódio, em comparação com lagartas alimentadas com folhas de milho não tratadas. Foram analisadas a mortalidade ao final do segundo instar larval, a duração do período larval e pupal, a

mortalidade larval e pupal e o peso de pupa. Não se observou efeito do silício na duração da fase larval e pupal, peso de pupa e na mortalidade de pupas. Entretanto, verificou-se maior mortalidade e aumento de canibalismo em grupos de lagartas ao final do segundo instar, e maior mortalidade de lagartas individualizadas no segundo e sexto instares, quando foram alimentadas com folhas de plantas de milho tratadas com a solução de silicato de sódio, em comparação com a testemunha. Observou-se que as mandíbulas das lagartas, nos seis instares, apresentaram desgaste acentuado na região incisora, quando em contato com folhas com maior teor de silício.

Moraes et al. (2005) avaliaram o efeito do silício na preferência do pulgão-da-folha (*Rhopalosiphum maidis*) em plantas de milho. Os tratamentos consistiram na aplicação de silicato de sódio via solo, solo + foliar, foliar (0,5% de SiO_2) e testemunha. Foram realizados testes de não-preferência com folhas destacadas e diretamente em plantas de milho. Verificou-se que os tratamentos nos quais o silício foi aplicado via solo mais uma adubação foliar, ou mediante duas aplicações foliares, foram os que apresentaram menor número de pulgões, aumentando a resistência das folhas e dificultando a alimentação desses insetos. De modo geral, o silício afetou a preferência do pulgão-da-folha. As pulverizações foliares mostraram-se mais eficientes em repelir os afídeos, sendo que duas aplicações do silicato de sódio afetou a preferência mais rapidamente do inseto do que uma aplicação foliar ou o tratamento via solo mais uma aplicação foliar.

O aumento da resistência de plantas de sorgo ao pulgão (*Schizaphis graminum*), por meio da aplicação de silicato de sódio via solo, foi estudado mediante teste de livre escolha (preferência do pulgão) e de confinamento (aspectos biológicos do pulgão). No ensaio não houve influência do silicato sobre a mortalidade, período pré-reprodutivo e reprodutivo. Entretanto, no teste de preferência, as plantas submetidas aos tratamentos com silicato de sódio apresentaram números significativamente menores de pulgões, cerca de 40% a menos, em relação às plantas não tratadas (COSTA; MORAES, 2002). Estes resultados corroboram trabalho anterior em que o maior teor de silício em plantas de sorgo, suplementadas via substrato com silicato de sódio, afetou a preferência para alimentação e a reprodução do pulgão-verde, induzindo resistência em genótipo suscetível (CARVALHO et al., 1999).

Em videira, Loni e Lucchi (2001) obtiveram bons resultados com a aplicação de solução de silicato de sódio (3%) mais cloreto de sódio (0,6%), no combate à traça-da-uva (*Lobesia botrana*). A mistura apresentou boa adesividade sobre os ovos da praga, formando uma rígida camada sobre eles em poucas horas. A mortalidade de ovos foi de 68% e 42% em dois anos consecutivos, enquanto no tratamento controle foi de 6% e 5%, respectivamente.

Plantas de arroz suplementadas com silício tornam-se mais resistentes à lagarta-amarela-do-colmo (*Scirpophaga incertulas* Walker), conforme estudos de Patchanee e Khan (1990). Os autores constataram que o fornecimento de silício na forma de silicato de sódio, via raiz, diminuiu significativamente o número de

larvas que penetraram no colmo, além de aumentar o tempo de penetração das mesmas.

Em plantas de centeio tratadas com silicato de sódio, observou-se que a preferência de oviposição do gorgulho-das-pastagens [*Listronotus bonariensis* (Kruschel)] foi afetada negativamente pela maior deposição de silício na superfície inferior das folhas (BARKER, 1989).

11. O silicato de sódio e outros estresses

Trabalhos utilizando silicato de sódio, bem como silicato de potássio, sugerem que a melhoria que o silício promove sobre a tolerância ao déficit hídrico e outros estresses, incluindo doenças, está associada com o aumento da defesa antioxidante, aliviando o dano oxidativo de moléculas funcionais celulares, pela maior produção de espécies reativas de oxigênio e mantendo muitos processos fisiológicos em condições estressantes. As plantas produzem ativamente formas reativas de oxigênio como moléculas sinalizadoras para controlar processos, tais como morte programada de células, respostas a estresses abióticos, defesa contra patógenos e sinais sistêmicos (MITTLER, 2002). Em estresses hídricos, por exemplo, um dos principais motivos para a inibição do crescimento e da habilidade fotossintética das plantas é a quebra do balanço entre a produção de espécies reativas de oxigênio e as defesas antioxidantes, ocasionando acúmulo de oxigênio reativo, o qual induz estresse oxidativo a proteínas, lipídios em membranas e outros componentes celulares (GONG et al., 2005).

O efeito da aplicação de silicato de sódio em trigo, nas mudanças induzidas pela seca em pigmentos fotossintéticos, proteínas e lipídios, em algumas atividades enzimáticas e na fotossíntese, foi investigado por Gong et al. (2005). Os resultados mostraram que a aplicação de silicato aumentou as atividades de algumas enzimas antioxidantes (superóxido dismutase, catalase e glutathione redutase); a insaturação dos ácidos graxos dos lipídios; o teor de pigmentos fotossintéticos e de proteínas, bem como de tióis. Por outro lado, o teor de peróxido de hidrogênio, a atividade de fosfolipase ácida e o estresse oxidativo de proteínas diminuíram pela aplicação de silicato de sódio, comparado com os tratamentos sem silício, sob condições de estresse hídrico. Além disso, a aplicação do silicato de sódio também aumentou a taxa de assimilação líquida de CO_2 em folhas de plantas com deficiência hídrica.

A aplicação exógena de silício, sob a forma de silicato de sódio, em bambu arbustivo (*Indocalamus barbatus*), diminuiu os efeitos deletérios da chuva ácida na fotossíntese. O tratamento com o silicato aumentou o conteúdo relativo de clorofila, a taxa fotossintética líquida, a condutância estomatal e diminuiu a concentração intercelular de CO_2 , em relação ao tratamento controle. Os resultados mostraram que a aplicação externa de silicato em *Indocalamus barbatus* pode minimizar os efeitos nocivos da chuva ácida sobre a atividade fotossintética da planta (YIN et al., 2008).

Em muitas regiões do mundo a salinidade de solos é um dos principais problemas para a agricultura. Ahmed et al. (2008)

conduziram experimentos com trigo em solos salinos, durante duas estações consecutivas de cultivo em casa de vegetação e em uma estação para ensaio de campo. Em condições de cultivo em vaso, os autores aplicaram 0, 250 ou 1.000 mg kg⁻¹ de SiO₂ na forma de metassilicato de sódio (Na₂SiO₃·5H₂O). Cada grupo foi dividido em dois subgrupos, aplicando-se 0 ou 25 ppm de boro na forma de ácido bórico. Cada subgrupo foi, ainda, subdividido em quatro níveis de salinidade. Os tratamentos foliares foram aplicados aos 40 e 70 dias após semeadura. Em condições de campo, entre vários tratamentos, constavam aqueles com 3 aplicações foliares de metassilicato de sódio, aos 35, 60 e 85 dias após semeadura, nas doses de 0, 250, 500 e 1.000 mg kg⁻¹ de SiO₂. Em condições de cultivo em vasos, a aplicação foliar do silicato de sódio, sozinho ou combinado com boro, sob condições salinas ou de não salinidade, aumentou significativamente a altura e área foliar. Com 250 ppm de SiO₂ ocorreu aumento significativo em todos os parâmetros de crescimento avaliados, ou seja, número de folhas, perfilhos, massa da parte aérea, altura e área foliar. No experimento de campo, todos os parâmetros de crescimento e produção foram incrementados significativamente com a aplicação do silicato, independentemente da dose de silício. As aplicações de silicato de sódio, isoladas ou em combinação com o boro, aumentaram os níveis de ácido giberélico e citocinina. Por outro lado, houve diminuição nas concentrações de ácido abscísico.

Em cevada, a aplicação foliar de uma solução a 0,2% de silicato de sódio aumentou a resistência do colmo ao acamamento (KHOROSHKIN et al., 1982). Como o acamamento é um dos

fatores limitantes na produção de arroz, Fallah (2008) estudou o efeito do silício, aplicado na solução nutritiva na forma de silicato de sódio, sobre parâmetros ligados ao acamamento das plantas. A suplementação do silicato de sódio no substrato hidropônico aumentou a altura das plantas, o comprimento dos internódios, a massa da matéria fresca, o momento de flexão, a resistência ao quebramento, além do índice de acamamento, que é a razão entre o momento de flexão e a resistência ao acamamento.

A aplicação de reguladores químicos, para evitar a iniciação floral em cana-de-açúcar, pode ser de interesse econômico, pois variedades com alto potencial para florescer estão sendo plantadas em regiões de baixa altitude e sem irrigação. Os produtos tradicionalmente usados na maturação da cana-de-açúcar pertencem ao grupo dos inibidores de crescimento ou ao grupo de ação herbicida, como paraquat, diquat, glifosato, etc (RODRIGUES, 1995). Herbicidas de contato, como o paraquat, por exemplo, atuam especificamente no Fotossistema II, bloqueando o fluxo de elétrons e impedindo a redução do NADPH, receptor final de elétrons. Com isso, há formação de radicais instáveis, reativos com a molécula de oxigênio, os quais causam danos em membranas, proteínas e ácidos nucleicos (CHAGAS, 2007).

Nesse sentido, o silicato de sódio tem potencial para minimizar os efeitos deletérios desses produtos utilizados como maturadores em cana-de-açúcar. Paraquat e diquat causam perdas severas de sacarose como resultado da interrupção da fotossíntese e do comportamento anormal das enzimas que

metabolizam açúcares. O pré-tratamento com silicato de sódio via foliar, antes da aplicação de paraquat e diquat, foi estudado por Alexander e Montalvo-Zapata (1970), para verificar o efeito no controle das enzimas oxidativas e hidrolíticas e a manutenção da atividade fotossintética. As plantas pulverizadas previamente com silicato de sódio não apresentaram danos, como foi constatado naquelas plantas sem silicato. O silicato de sódio evitou a atividade excessiva da amilase e invertase. As atividades das enzimas foliares (fosfatase, ATPase e peroxidase) foram reprimidas pelo aumento nas concentrações dos dessecantes, mas controladas pelo uso do silicato de sódio. Assim, a aplicação foliar de silicato de sódio, antes do uso de maturadores em cana-de-açúcar, pode diminuir os efeitos indesejáveis destes compostos químicos, por meio da regulação de enzimas críticas. De acordo com Crusciol (2008), o uso do silício via foliar, isolado ou associado à maturadores, tem mostrado efeito positivo potencial sob parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar.

12. O silicato de sódio na agricultura orgânica

Na produção orgânica de alimentos, o silicato de sódio é aceito sem restrições para ser utilizado como protetor contra pragas e doenças. Isto pode ser constatado, por exemplo, no Codex Alimentarius da FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), onde consta um conjunto de normas alimentares, aprovadas internacionalmente para a produção orgânica de alimentos. A comissão desta publicação é formada por 181 países membros, incluindo o Brasil. O silicato de sódio está incluído na relação de substâncias minerais para controle de doenças e pragas, sem restrições de uso (CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION, 2001).

Por séculos, agricultores utilizaram, e ainda utilizam, extratos vegetais para proteger suas culturas contra fungos patogênicos. Apesar do empirismo na utilização destes preparados, a análise química revela que eles contêm alguns dos ingredientes ativos utilizados no manejo fitossanitário. É o caso dos preparados à base de cavalinha (*Equisetum arvense* L.), por exemplo o Preparado Biodinâmico P508, utilizados até hoje na proteção contra doenças fúngicas. Essa planta possui altíssimos

teores de silício em seus tecidos e o seu extrato aquoso contém silicato de sódio (BÉLANGER et al., 1995). Receitas à base de cavalinha ou indicações de uso para o silicato de sódio são encontradas em publicações ligadas à agricultura orgânica ou ecológica (PINHEIRO et al., 1985; KOEPF et al., 1987; DONNARUMMA; LATORRE, 2000; PENTEADO, 2004).

Manzoni et al. (2006) testaram, *in vitro*, o efeito do extrato aquoso de *Equisetum hyemale* L. (cavalinha holandesa), misturado em meio BDA (batata-dextrose-ágar), sobre o crescimento micelial de *Alternaria solani*. A porcentagem de inibição do micélio do fungo variou de 12% (dose de 7% de extrato) a 56% (dose de 5% de extrato), comparativamente à testemunha.

A adoção de métodos integrados de controle de pragas e doenças tem levado a uma redução no uso de pesticidas, o que inclui o uso do silicato de sódio (GULLINO, 1996). Brunelli (1995) descreve os principais produtos naturais de origem mineral, vegetal ou animal, no combate a doenças fúngicas. Entre os produtos minerais encontra-se o silicato de sódio. No sistema orgânico de produção de uva não é incomum o uso de silicato de sódio para combater doenças, como ocorre com oídio (*Uncinula necator*) (REYNOLDS et al., 2004). Hofmann (1996) estudou os efeitos do manejo orgânico comparado ao convencional e/ou integrado em videira. O sistema convencional incluiu o uso de agrotóxicos e fertilizantes minerais. O sistema orgânico utilizou fertilizantes orgânicos, controle mecânico de ervas daninhas, extratos vegetais, agentes biológicos e silicato de sódio, entre outros produtos. O silicato de sódio controlou eficientemente o míldio (*Plasmopara viticola*) em um dos sistemas orgânicos estudados.

13. Considerações finais

A obtenção ou aperfeiçoamento de métodos complementares ou alternativos na busca de uma agricultura mais sustentável e produtiva é fundamental para que haja cada vez menos impactos negativos ao meio ambiente com o uso de agrotóxicos. Não menos importante é a segurança alimentar para o consumidor final e a não contaminação do trabalhador rural. A ideia da utilização de silicatos na agricultura é antiga, sendo que atualmente há respaldo científico para o seu uso. O silicato de sódio, aplicado via foliar, é um insumo que pode ser agregado ao manejo nutricional e fitossanitário das culturas, trazendo benefícios para a agricultura e sem deixar resíduos no meio ambiente.

14. Referências

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

AHMED, A. H. H.; HARB, E. M.; HIGAZY, M. A.; MORGAN, Sh. H. Effect of silicon and boron foliar applications on wheat plants grown under saline soil conditions. **International Journal of Agricultural Research**, Faisalabad, v. 3, n. 1, p. 1-26, 2008.

ALESHIN, N. E.; AVAKYAN, E. R.; DYAKUNCHAK, S. A.; ALESHIN, E. P.; BARYSHOK, V. P.; VORONKOV, M. G. Role of silicon in the resistance of rice to piriculariosis. **Doklady Akademii Nauk SSSR**, Moscow, v. 291, n. 2, p. 499-502, 1986.

ALEXANDER, A. G.; MONTALVO-ZAPATA, R. Use of silicon to preserve sucrose in sugarcane desiccated with paraquat and diquat. **Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico**, Rio Piedras, v. 54, n. 2, p. 247-263, 1970.

ARNON, D. I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, Rockville, v. 14, p. 371-375, 1939.

ARRHENIUS, O. The phosphoric acid question. IV. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, n. 16A, p. 307-310, 1930.

BARBOSA, M. A.; LARANJEIRA, D.; COULHO, R. S. Efeito de indutores no controle da ramulose do algodoeiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, p. 105, ago. 2005. Edição dos Resumos do 38. Congresso Brasileiro de Fitopatologia, Brasília, DF, ago. 2005.

BARKER, G. M. Grass host preferences of *Listronotus bonariensis* (Coleoptera: Curculionidae). **Journal of Economic Entomology**, Lanham, v. 82, n. 6, p. 1807-1816, Dec. 1989.

BARTLETT, J. M. Eggs preserved with silicate of soda. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF APPLIED CHEMISTRY, 8., 1912, Washington, DC. **Discussions...** Concord: Rumford, [1912]. v. 18, p. 51-56.

BASAGLI, M. A. B.; MORAES, J. C.; CARVALHO, G. A.; ECOLE, C. C.; GONÇALVES-GERVÁSIO, R. C. R. Effect of sodium silicate application on the resistance of wheat plants to the green-aphids *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 32, n. 4, p. 659-663, Oct./Dec. 2003.

BÉLANGER, R.R.; BOWEN, P.A.; EHRET, D.L.; MENZIES, J.G. Soluble silicon - its role in crop and disease management of greenhouse crops. **Plant Disease**, St. Paul, v. 79, n. 4, p. 329-336, 1995.

BELYAEV, G. N. The influence of addition of boron, copper, zinc and water glass on the effectiveness of potassium chloride. **Agrokhimiya**, Moscow, v. 11, p. 28-33, 1993.

BERGER, R. Colloids as preservatives. **Zeitschrift für Chemie und Industrie der Kolloide**, Dresden, v. 6, p. 172-174, 1910.

BI, Y.; TIAN, S. P.; GUO, Y. R.; GE, Y. H.; QIN, G. Z. Sodium silicate reduces postharvest decay on Hami melons: induced resistance and fungistatic effects. **Plant Disease**, St. Paul, v. 90, n. 3, p. 279-283, 2006.

BOFF, P.; GONÇALVES, P. A. S.; DEBARBA, J. F. Efeito de preparados caseiros no controle da queima-acinzentada na cultura da cebola. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 17, n. 2, p. 81-85, jul. 1999.

BOTELHO, D. M. S.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; BOTELHO, C. E.; SOUZA, P. E. Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, n. 6, p. 582-588, nov./dez. 2005.

BREHMER. Potassium silicate. **Die Gartenwelt**, Berlin, v. 14, p. 220-222, 1911.

BRUNELLI, A. I prodotti naturali nella lotta alle malattie fungine. **La Difesa delle Piante**, Torino, v. 18, n. 2, p. 57-69, 1995.

CARLISLE, E. M. Silicon: an essential element for the chick. **Science**, Washington, v. 178, n. 4061, p. 619-621, Nov. 1972.

CARLISLE, E. M. Silicon. In: O'DELL, B. L.; SUNDE, R. A. (Ed.). **Handbook of nutritionally essential mineral elements**. New York: Marcel Dekker, 1997. p. 603-608.

CARVALHO, S. P.; MORAES, J. C.; CARVALHO, J. G. Efeito do silício na resistência do sorgo (*Sorghum bicolor*) ao pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Rond.) (Homoptera: Aphididae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, Londrina, v. 28, n. 3, p. 505-510, 1999.

CASULLI, F.; SANTOMAURO, A.; TAURO, G.; GATTO, M. A.; FARETRA, F. Effectiveness of natural compounds in the suppression of the powdery mildew fungi *Sphaerotheca fusca* and *Uncinula necator*. **Bulletin-OILB/SROP**, v. 25, n. 10, p. 179-182, 2002.

CHAGAS, R. M. **Alterações fotossintéticas e respostas oxidativas em plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) tratadas com paraquat**. 2007. 82 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CHEN, C. H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, Ottawa, v. 47, p. 125-131, 1969.

CHISHAKI, N.; HORIGUCHI, T. Responses of secondary metabolism in plants to nutrient deficiency. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 43, p. 987-991, 1997.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. **Codex alimentarius: organically produced foods**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations: World Health Organization, [2001?]. 73 p. Disponível em: <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/Y2772E/Y2772e.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2009.

COSTA, R. R.; MORAES, J. C. Resistência induzida em sorgo por silicato de sódio e infestação inicial pelo pulgão-verde *Schizaphis graminum*. **Ecossistema**, Espírito Santo do Pinhal, v. 27, n. 1/2, p. 37-39, 2002.

CRUSCIOL, C. A. C. **Fisiologia e efeito de produtos para maturação**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 2008. 93 p. Palestra apresentada no XII Simpósio Agroindustrial Internacional da STAB, Sertãozinho, set. 2008. Disponível em: <<http://tinyurl.com/css33y>>. Acesso em: 28 out. 2008.

DAKORA, F. D. Silicon nutrition and N₂ fixation in symbiotic legumes In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. [**Proceedings...**]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005. p. 133.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 1999. 403 p. (Studies in plant science, 8).

DAVY, H. **Elements of agricultural chemistry, in a course of lectures for the board of agriculture**. New York: Eastburn, Kirk, 1815. 332 p. Disponível em: <<http://tinyurl.com/d7tvpo>>. Acesso em: 3 abr. 2009.

DONALD, J. P. L.; MENDOZA, M. N. R.; SANCHES GARCIA, P.; MORA AGUILERA, A.; CARDENAS SORIANO, E. Foliar fertilization of mango (cv. Haden) for the control of malformation. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 594, p. 667-673, 2002.

DONNARUMMA, L.; LA TORRE, A. Sali di rame in agricoltura biologica e possibili alternative (difesa delle piante). **Informatore Fitopatologico**, Bologna, v. 50, n. 4, p. 27-31, 2000.

ENCYCLOPEDIA: sodium silicate. [S.I.]: NationMaster, 2005. Disponível em: <<http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Sodium-silicate>>. Acesso em: 12 mar. 2009.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, DC, v. 91, p. 11-17, 1994.

EPSTEIN, E. Photosynthesis, inorganic plant nutrition, solutions, and problems. **Photosynthesis Research**, The Hague, v. 46, n. 1/2, p. 37-39, Nov. 1995.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006. 403 p.

EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 69, p. 139-144, 1998.

FALLAH, A. Study of the effect of silicon on lodging parameters in rice plants under hydroponics culture in a greenhouse experiment. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 4., 2008, Wild Coast Sun. **[Proceedings...]**. Scottsville: University of Kwazulu-Natal, 2008. p. 19.

FISHER, R. A. A preliminary note on the effect of sodium silicate in increasing the yield of barley. **Journal of the Agricultural of the University College of Wales**, Aberystwyth, v. 19, p. 132-139, 1929.

GANGOPADHYAY, S. Nitrogen, sugar and silicon status of rice leaves in relation to brown spot disease. **Current Trends in Life Sciences**, New Delhi, v. 6, p. 213-223, 1979.

GILL, M. A.; RAHMATULLAH IRFAN, M.; MAQSOOD, M. A. Silicon requirement of coarse and fine varieties of rice. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, n. 2, p. 163-170, 2007.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, Oxford, v. 169, n. 2, p. 313-321, 2005.

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-de-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 305-310, Apr./June 2002.

GOUSSAIN, M. M.; PRADO, E.; MORAES, J. C. Effect of silicon applied to wheat plants on the biology and probing behavior of the greenbug *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 807-813, Sept./Oct. 2005.

GREENDA, A.; BADORA, A. The influence of aluminium and manganese toxicity in the soil on the bioaccumulation of Al and Mn in two cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L.) In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 40., 2001, Hannover. **Plant nutrition: food security and sustainability of agro ecosystems through basic and applied research.** Dordrecht: Kluwer, 2001. p. 522-523. (Developments in plant and soil sciences, 92).

GULLINO, M. L. Miglioramento della qualita nella difesa delle colture. **Colture Protette**, Bologna, v. 25, n. 2, p. 93-99, 1996.

GUO, Y. R.; BI, Y.; CAO, Z. Inhibiting muskmelon pink mold rot of cantaloupe “Yujinxiang” treated with silicon agents. **Acta Horticulturae Sinica**, Wageningen, v. 30, n. 5, p. 586-588, 2003a.

GUO, Y. R.; BI, Y.; LIU, L.; LIU, G.; CAO, Z. Y. Influence on POD, PAL and post-harvest respiration of muskmelon treated by silicon-agent. **Xibei Zhiwu Xuebao**, Shaanxi, v. 23, n. 11, p. 1894-1898, 2003b.

GUO, Y. R.; LIU, L.; ZHAO, J.; BI, Y. Use of silicon oxide and sodium silicate for controlling *Trichothecium roseum* postharvest rot in Chinese cantaloupe (*Cucumis melo* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, London, v. 42, n. 8, p. 1012-1018, 2007.

GUO, Y. R.; ZHAO, H.; CHEN, D. R.; LIU, L.; BI, Y. Inhibitory mechanisms of two silicon compounds on mildew powder of melon. **Scientia Agricultura Sinica**, Beijing, v. 38, n. 3, p. 576-581, 2005a.

GUO, Y. R.; ZHAO, H.; CHEN, D. R.; LIU, L.; BI, Y. Inhibitive mechanisms of two silicon compounds on powdery mildew of melon. **Agricultural Sciences in China**, Amsterdam, v. 4, n. 5, p. 362-367, 2005b.

HALL, A. D. Note on the effect of sodium silicate in increasing the yield of barley. **Journal of the Agricultural Society of the University College of Wales**, Aberystwyth, v. 19, p. 586-588, 1929.

HANCE, F. E. Phosphate fixation in Hawaiian soils. **Hawaiian Planters' Record**, Honolulu, v. 37, p. 182-196, 1933.

HANISCH, H. C. Effect of sodium silicate on the population growth of aphids on wheat plants receiving different amounts of nitrogen. **Zeitschrift für Angewandte Entomologie**, Hamburg, v. 91, n. 2, p.138-149, 1981.

HEDGE, B. A.; PAWAR, R. B. Effect of silicon foliar application on growth, tillering and photosynthetic efficiency in rice varieties Soorya Suhasini. **Journal of Shivaji University: Science & Technology**, Kolhapur, v. 18, p. 191-193, 1981.

HENDRICK, J. The preservation of eggs. **Journal of the Agricultural Society of the University College of Wales**, Aberystwyth, v. 2, p. 100, 1907.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Silicon and abiotic stress. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka. **[Proceedings...]**. Tsuruoka: Silicon in Agriculture Organizing Committee: Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002. p. 99 - 104.

HOFMANN, U. Comparative studies on organic and conventional integrated cropping systems in viticulture. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COOL CLIMATE ENOLOGY AND VITICULTURE, 4., 1996, Rochester, NY. **[Proceedings...]**. Geneva, NY: New York State Agricultural Experiment Station, 1996. p. 37-43. Edited by T. Henick-Kling, T.E. Wolf, E.M. Harkness.

HOFMANN, U. Einatz von pflanzenstarkungsmitteln gegen *Oidium tuckeri* - echter mehltau der Rebe. Versuchsergebnisse von 1990-1996. In: INTERNATIONALER ERFAHRUNGSUSTAUSCH UBER FORSCHUNGSERGEBNISSE ZUM OKOLOGISCHEN OBSTBAU, 8., 1997, Weinsberg. [**Proceedings...**]. Weinsberg: [s.n.], 1997. p. 55-59. Edited by U. Hallenbach, M. Boos.

HOODA, K. S.; SRIVASTAVA, M. P. Role of silicon in the management of rice blast. **Indian Phytopathology**, New Delhi, v. 49, n. 1, p. 26-31, 1996.

HUANG, C. Y.; SHEN, B. Amelioration of aluminium toxicity to barley by silicon application. **Plant Nutrition and Fertilizer Science**, Beijing, v. 9, n. 1, p. 98-101, 2003.

HUANG, Y. N.; LIU, J.; ZHANG, Z. X. Effect of spraying silicon in the seedling stage of ginger on membrane fluid peroxidation and leaf defense enzyme activity. **Chinese Journal of Eco-Agriculture**, Beijing, v. 15, n. 3, p. 58-60, 2007.

ILER, R. K. **The chemistry of silica**: solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry. New York: Wiley-Interscience, 1979. 896 p.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicato de sódio**. 1995. 200 p. Tese (Doutor em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KAMENIDOU, S.; CAVINS, T. J.; MAREK, S. Evaluation of silicon as a nutritional supplement for greenhouse zinnia production. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 119, p. 297-301, 2009.

KAMENIDOU, S.; CAVINS, T. J.; MAREK, S. Silicon supplements affect horticultural traits of greenhouse-produced ornamental sunflowers. **HortScience**, Alexandria, v. 43, n. 1, p. 236-239, 2008.

KHOROSHKIN, M. N.; KHOROSHKIN, B. M.; OZOLZARS, D. Cultivation of high-yielding nonlodging spring barley. **Sbornik Nauchnykh Trudov**, Novosibirsk, p. 12-16, 1982.

KOEPF, H. H.; PETTERSON, B. D.; SCHAUMANN, W. **Agricultura biodinâmica**. 4. ed. Nobel: São Paulo, 1987. 333 p.

KOLESNIKOV, M. P.; GINS, V. K. Forms of silicon in medicinal plants. **Applied Biochemistry and Microbiology**, New York, v. 37, n. 5, p. 524-527, 2001.

KOMBRINK, E.; SOMSSICH, I. E. Defense responses of plants to pathogens. **Advances in Botanical Research**, London, v. 21, p. 1-34, 1995.

LAÍN, E. R. **Silicio**: enfermedades degenerativas óseas. Madrid: Real Academia de Ciencias Veterinárias, 1995. Disponível em: <<http://tinyurl.com/nxorhb>>. Acesso em: 8 ago. 2006.

LAKSHMIKANTHAN, K.; MATHEW, J.; POTTY, N. N.; KARTHICK, A. Source vs. efficiency variation of silica management in wet rice. **Research on Crops**, Hisar, v. 3, n. 2, p. 348-352, 2002.

LAWS, W. D. Water-soluble application to a calcareous clay and effect on soil properties and nutrient uptake by plants. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 15, p. 89-92, 1951.

LEUSCH, H. J.; BUCHENAUER, H. Si-Gehalte und Si-Lokalisation im Weizenblatt und deren Bedeutung für die Abwehr einer Mehltauinfektion. **Kali-Briefe**, Bünthof, v. 19, n. 1, p. 13-24, 1988.

LI, C. H.; LIU, X. B.; CHU, T. D.; YANG, Q. Study on the effect of silicon, zinc and manganese nutrition on high-yielding maize seedlings. **Soils and Fertilizers**, Beijing, v. 44, n. 4, p. 15-17, 1999.

LIANG, Y. C.; SHEN, Q.; ZHANG, A.; SHEN, Z. G. Effect of calcium and silicon on growth of and nutrient uptake by wheat exposed to simulated acid rain. **Yingyong Shengtai Xuebao**, v. 10, n. 5, p. 589-592, 1999.

LIANG, Y. C.; SUN, W. C.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 147, n. 2, p. 422-428, 2007.

LIMA FILHO, O. F. de; ABDALLA, A. L. **Desordens nutricionais e a síntese de compostos fenólicos e taninos totais em guandu e leucena**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; São Paulo: FAPESP, 2005. 68 p. il. color. Disponível em: <<http://tinyurl.com/m7kp5n>>. Acesso em: 24 abr. 2009.

LIMA FILHO, O. F. de; GROTHGE-LIMA, M. T.; TSAI, S. M. Efeito do silício na absorção de nitrogênio, fósforo e potássio em duas cultivares de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Solo: alicerce dos sistemas de produção**. Ribeirão Preto: UNESP: SBSCS, 2003. 1 CD-ROM.

LIMA FILHO, O. F. de; LIMA, M. T. G. de; TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 87, set. 1999. Encarte Técnico, Piracicaba, p. 1-7, set. 1999.

LIMA FILHO, O. F. de; MOLDES, C. A.; AZEVEDO, R. A.; GOMES JÚNIOR, R. A.; ABDALLA, A. L.; TSAI, S. M. Biochemical responses of wheat under oidium attack in the presence of silicon under hidroponic conditions. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. [**Proceedings...**]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005a. p. 142.

LIMA FILHO, O. F. de; SILVA, W. M.; TSAI, S. M. Relationship between silicon content physical and chemical parameters of tropical savanna soils. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. [**Proceedings...**]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005b. p. 143.

LIMA FILHO, O. F. de; TSAI, S. M. **Crescimento e produção do trigo e aveia branca suplementados com silício**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2007. 34 p. (Embrapa Agropecuária Oeste. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 41).

LIMA FILHO, O. F. de; TSAI, S. M. Fixação simbiótica de nitrogênio em soja cultivada em perlita e suplementada com silicato de sódio. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 27.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 11.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 9.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 6., 2006, Bonito, MS. **Fertbio 2006**: a busca das raízes: anais. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 82). 1 CD-ROM.

LIMA FILHO, O. F. de; TSAI, S. M.; MERCANTE, S. M.; FIGUEIREDO, L. A. The effect of silicon on nodulation and nitrogen fixation of soybean and bean under hydroponic conditions. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. [Proceedings...]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005c. p. 110.

LIMA, M. T. G. de **Interrelação cancro da haste (*Diaporthe phaseolorum* f. sp. *meridionalis*), nodulação (*Bradyrhizobium japonicum*) e silício em soja [*Glycine max* (L.) Merrill]**. 1998. 58 p. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

LOEPER, J.; GOY-LOEPER, J.; ROZENSZTAJN, L.; FRAGNY, M. The antiatheromatous action of silicon. **Atherosclerosis**, Limerick, v. 33, n. 4, p. 397-408, Aug. 1979.

LONI, A.; LUCCHI, A. Preliminary study on the efficacy of sodium salts for the control of the grape vine moth *Lobesia botrana* (Den. & Schiff.). **Bulletin-OILB/SROP**, v. 24, n. 7, p. 99-102, 2001. Edição de Proceedings of the IOBC/WPRS Working Group "Integrated Control in Viticulture", Ponte de Lima, Portugal, Mar. 2001.

LU, G.; CAO, J. S. Effects of silicon on earliness and photosynthetic characteristics of melon. **Acta Horticulturae Sinica**, Wageningen, v. 28, n. 5, p. 421-424, 2001.

LUX, A.; VACULIK, M.; TANIMOTO, E.; LUXOVA, M.; KULIKOVA, Z.; LICHTSCHEIDL, I. Silicon improves growth and increases root cell wall extensibility of cadmium treated maize. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 4., 2008, Wild Coast Sun. [Proceedings...]. Scottsville: University of Kwazulu-Natal, 2008. p. 47.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. Effect of silicate on phosphorus availability for rice in a P-deficient soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 133, n. 2, p. 151-155, 1991.

MAKSIMOVIC, J. D.; BOGDANOVIC, J.; MAKSIMOVIC, V.; NIKOLIC, M. Silicon modulates the metabolism and utilization of phenolic compounds in cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown at excess manganese. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 170, n. 6, p. 739-744, 2007.

MANZONI, C. G.; MILANESI, P.; WEBER, M. N. D.; BLUME, E.; MUNIZ, M. F. B. Efeito do extrato aquoso de *Equisetum hymenale* no crescimento micelial de *Alternaria solani*. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, p. S 139, ago. 2006. Edição dos Resumos do 39. Congresso Brasileiro de Fitopatologia, Salvador, ago. 2006.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1995. 887 p.

MARTINETTI, L.; PAGANINI, F. Effect of organic and mineral fertilisation on yield and quality of zucchini. **Acta Horticulturae**, The Hague, v. 700, p. 125-128, 2006.

MASUDA, T. **Foliar spray controlling plant diseases**. Patent JP03141206 e JP2517764, 26 out. 1989. Patente inscrita, 1991.

MATYCHENKOV, V. V. **Silicon containing a mixture for the activation of the plant natural protection mechanisms against stresses**. Patent US2008226530. Patente inscrita nos Estados Unidos. 2008. 6p.

McAVOY, R. J.; BIBLE, B. B. Silica sprays reduce the incidence and severity of bract necrosis in poinsettia. **HortScience**, Alexandria, v. 31, n. 7, p. 1146-1149, 1996.

McCOY, S. **Organic apples**: a production guide. [S.l.]: State of Western Australia, 2007. 33 p. (Bulletin, 4715). Disponível em: <<http://tinyurl.com/llhq5k>>. Acesso em: 3 fev. 2009.

MECFEL, J.; HINKE, S.; GOEDEL, W. A.; MARX, G.; FEHLHABER, R.; BÄUCKER, E.; WIENHAUS, O. Effect of silicon fertilizers on silicon accumulation in wheat. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 170, n. 6, p. 769-772, 2007.

MIRAMONTES-FLORES, B.; ARROYO-VÁZQUEZ, L.; ALVA-RESÉNDIZ, M. H.; ESPIRICUETA-REYNA, T. Efecto del metassilicato de sodio sobre el crecimiento del cultivo de chícharo. **Terra Latinoamericana**, Chapingo, v. 22, n. 2, p. 169-174, 2004.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

MONCEAUX, R. H. Le silicium etude biologique et pharmacologique. **Produits Pharmaceutiques**, Paris, v. 5, n. 3, p. 99-109, 1960.

MORAES, J. C.; GOUSSAIN, M. M.; BASAGLI, M. A. B.; CARVALHO, G. A.; ECOLE, C. C.; SAMPAIO, M. V. Silicon influence on the tritrophic interaction: wheat plants, the greenbug *Schizaphis graminum* (Rondani) (Homoptera: Aphididae), and its natural enemies, *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae) and *Aphidius colemani* Viereck (Hymenoptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 33, n. 5, p. 619-624, Sept./Oct. 2004.

MORAES, J. C.; GOUSSAIN, M. M.; CARVALHO, G. A.; COSTA, R. R. Feeding non-preference of the corn leaf aphid *Rhopalosiphum maidis* (Fitch, 1856) (Hemiptera: Aphididae) to corn plants (*Zea mays* L.) treated with silicon. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 761-766, 2005.

MORAES, S. R. J.; POZZA, E. A.; ALVES, E.; ADELIA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; LIMA, P. H.; BOTELHO, A. O. Efeito de fontes de silício na incidência e na severidade da antracnose do feijoeiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 31, n. 1, p. 69-75, jan./fev. 2006.

NELWAMONDO, A.; DAKORA, F.D. Silicon promotes nodule formation and nodule function in symbiotic cowpea (*Vigna unguiculata*). **New Phytologist**, Oxford, v. 142, n. 3, p.463-467, June 1999.

OWINO-GERROH, C.; GASCHO, G. J. Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 35, n. 15/16, p. 2369-2378, 2004.

PATCHANEE, C.; KHAN, R. Z. Effect of silica on tolerance of floating rice to yellow stem borer (*Scirpophaga incertulas* Walker). **Thai Agricultural Research Journal**, Bangkok, v. 8, n. 3, p. 122-124, 1990.

PAWAR, R. B.; HEDGE, B. A. Effect of silicon foliar application on growth, tillering and photosynthetic efficiency in oryza sativa var. satya. **Indian Journal of Plant Physiology**, New Delhi, v. 21, n. 1, p. 12-16, 1978.

PENTEADO, S. R. Defensivos alternativos. In: AMBROSANO, E. S.; ROSSI, F.; GROppo, G. A.; GUIRADO, N.; MENDES, P. C. D.; AREVALO, R. A. (Ed.). **Curso de capacitação em agricultura orgânica**. Campinas: CATI, 2004. p. 168-174.

PERAZZO, A. A. Manufacture of sodium silicate. **Anales de la Asociación Química Argentina**, Buenos Aires, v. 8, p. 404-409, 1920.

PERRY, C. C.; KEELING-TUCKER, T. Aspects of the bioinorganic chemistry of silicon in conjunction with the biometals calcium, iron and aluminium. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 69, n. 3, p. 181-191, 1998.

PINHEIRO, J. B.; POZZA, E. A.; CARVALHO, J. G.; BOTELHO, D. M. Associação de fungicidas e silício no controle da ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi*). **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, DF, v. 30, p. 76, ago. 2005. Edição dos Resumos do 38. Congresso Brasileiro de Fitopatologia, Brasília, DF, ago. 2005.

PINHEIRO, S.; AURVALLE, A.; GUAZZELLI, M. J. **Agropecuária sem veneno**. Porto Alegre: L&PM, 1985. 128 p.

PIORR, H. P. Reducing fungicide applications by using sodium silicate and wettable sulfur in cereals. **Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen**, Gent, v. 51, n. 2B, p. 719-729, 1986.

PONTI, I.; BRUNELLI, A.; TOSI, C.; BASAGLIA, M.; BEVILACQUA, T.; EMILIANI, G.; CONT, C.; VICCINELLI, R. Verifica dell'attività di diversi preparati contro la maculatura bruna del pero. **Informatore Fitopatologico**, Bologna, v. 43, n. 5, p. 45-52, 1993.

PROPFE, H. **Procedure for the production of sodium silicate.** Patentbl. 18.272, 3 jun. 1896. Patente inscrita na Alemanha.

RAFI, M. M.; EPSTEIN, E.; FALK, R. H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 151, p. 497-501, 1997.

RAINS, D. W.; EPSTEIN, E.; ZASOSKI, R. J.; ASLAM, M. Active silicon uptake by wheat. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 280, n. 1/2, p. 223-228, feb. 2006.

RALEIGH, G. J. **Some effects of various silicates, lime, and gypsum on growth of tomato plants in western and eastern soils at low of phosphorus nutrition.** Ithaca: Cornell University, 1953. 18 p. (Agricultural Experiment Station. Memoir, n. 326).

RANGANATHAN, S.; SUVARCHALA, V.; RAJESH, Y. B. R. D.; PRASAD, M. S.; PADMAKUMARI, A. P.; VOLETI, S. R. Effects of silicon sources on its deposition, chlorophyll content, and disease and pest resistance in rice. **Biologia Plantarum**, Prague, v. 50, n. 4, p. 713-716, 2006.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, Cambridge, v. 58, p. 179-207, 1983.

RESULTS of fertilizer experiments with potassium silicate and like substances during 1910. **Experiment Station Record U. S. Department of Agriculture**, Washington, DC, v. 25, p. 217, 1912.

REYNOLDS, A. G.; CLIFF, M.; WARDLE, D. A.; KING, M. Evaluation of winegrapes in British Columbia: new cultivars and selections from Germany and Hungary. **HortTechnology**, Alexandria, v. 14, n. 3, p. 420-436, 2004.

RODGERS-GRAY, B. S.; SHAW, M. W. Effects of straw and silicon soil amendments on some foliar and stem-base diseases in pot-grown winter wheat. **Plant Pathology**, Oxford, v. 53, n. 6, p. 733-740, 2004.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, Instituto de Biociências, 1995. 101 p.

ROGALLA, H.; ROMHELD, V. Mechanism of silicon-mediated manganese tolerance of *Cucumis sativus* L.: effect of silicon nutrition on manganese concentration in the intercellular washing fluid. In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 40., 2001, Hannover. **Plant nutrition: food security and sustainability of agro ecosystems through basic and applied research**. Dordrecht: Kluwer, 2001. p. 258-259. (Developments in plant and soil sciences, 92).

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

ROTHAMSTED RESEARCH. **Guide to the classical and other long-term experiments, datasets and sample archive**. Harpenden, 2006. 56 p. il. color. Título da capa: Rothamsted: long-term experiments. Disponível em: <<http://tinyurl.com/n42zml>>. Acesso em: 23 mar. 2009.

SADANANDAN, A. K.; VARGHESE, E. J. Role of silicate in the uptake of nutrients by rice plants in the laterite soils of Kerala. **Agricultural Research Journal of Kerala**, Trivandrum, v. 7, n. 2, p. 91-96, 1969.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, New York, v. 58, p. 151-199, 1997.

SCHWARZ, K.; MILNE, D. B. Growth-promoting effects of silicon in rats. **Nature**, London, v. 239, p. 333-334, 1972.

SENAPOTY, D.; BHAGABATI, K. N.; DAS, J. C. Comparative efficacy of few non-conventional against leaf blast disease of rice seedlings. **Journal of the Agricultural Science Society of North East India**, v. 13, n. 2, p. 234-236, 2000a.

SENAPOTY, D.; BHAGABATI, K. N.; DAS, J. C. Effect of non-conventional chemicals on susceptibility of rice seedlings to blast disease. **Indian Phytopathology**, New Delhi, v. 53, n. 4, p. 459-460, 2000b.

SHEWRY, P. R.; LUCAS, J. A. Plant proteins that confer resistance to pests and pathogens. **Advances in Botanical Research**, London, v. 26, p. 135-192, 1997.

SILICATO de sódio: esquema de fabricação. [S.l.]: Solvay Portugal, 2009. Disponível em: < <http://tinyurl.com/nfc64a>>. Acesso em: 12 mar. 2009.

SILICON fertilizer. Gainesville: University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences, 2000. 7 p.

SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka. **[Proceedings...]**. Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002. 281 p.

SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. [**Proceedings...**]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005. 152 p.

SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 4., 2008, Wild Coast Sun. [**Proceedings...**]. Wild Coast Sun: University of Kwazulu-Natal; South African Sugarcane Research Institute, 2008. 110 p.

SINGH, K. P.; SARKAR, M. C. Phosphorus availability in soils as affected by fertilizer phosphorus, sodium silicate and farmyard manure. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, New Delhi, v. 40, n. 4, p. 762-767, 1992.

SINGH, S.; DUTT, O.; PAL, D. Utilization of phosphate from different phosphorus carriers by sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Journal of Nuclear Agriculture and Biology**, New Delhi, v. 23, n. 4, p. 238-241, 1994.

SOLOMONS, N. W. The other trace mineral: manganese, molybdenum, vanadium, nickel, silicon, and arsenic. In: SOLOMONS, N. W.; ROSENBERG, I. H. (Ed.). **Absorption and malabsorption of mineral nutrients**. New York: Alan R. Liss, 1984. p. 269-295.

SOLUBLE sodium silicate manufacture. [S.I.]: New Zealand Institute of Chemistry, 2008. Disponível em: <<http://www.nzic.org.nz/ChemProcesses/production/1G.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2009.

SRIPANYAKORN, S.; JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R. P. H.; POWELL, J. J. Dietary silicon and bone health. **Nutrition Bulletin**, Oxford, v. 30, p. 222-230, 2005.

STOYANOVA, Z.; ZOZIKOVA, E.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELO, J.; DONCHEVA, S. The effect of silicon on the symptoms of manganese toxicity in maize plants. **Acta Biologica Hungarica**, Budapest, v. 59, n. 4, p. 479-487, 2008.

SUBRAMANIAN, S.; GOPALSWAMY, A. Influence of silicate and phosphate materials on availability and uptake of silicon and phosphorus in acid soil. **Oryza**, Cuttack, v. 27, n. 3, p. 267-273, 1990.

SUNILKUMAR, B.; GEETHAKUMARI, V. L. Shade response of upland rice cultivars (*Oryza sativa* L.) as influenced by silica application. **Journal of Tropical Agriculture**, Thrissur, v. 40, n. 1/2, p. 67-70, 2002.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. (Ed.). **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. cap. 5, p. 420-433.

UNDERSTANDING our products. [S.l.]: PQ Corporation, [2009?]. Disponível em: <<http://www.pqcorp.com/technicalservice/Understandingourproducts.asp>>. Acesso em: 12 mar. 2009.

VERRIER, A. H. **Sodium metasilicate**. Patent GB0800921. 14 jan. 1908.

VESTERBERG, A. Silicates of sodium. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF APPLIED CHEMISTRY, 8., 1912, Washington, DC. **Discussions...** Concord: Rumford, [1912]. v. 2, p. 255-259.

VIAZZO, M. **Insecticidal foliar plant nutrient composition**. Patent IT1305976. Patente inscrita na Itália. 2001.

WANG, Y. R.; CHEN, P. Selenium absorption and distribution in rice (*Oryza sativa* L.) plant and effects of mixed application of Se and Si. **Acta Phytophysiologica Sinica**, Beijing, v. 22, n. 4, p. 344-348, 1996.

WEIN, E. Applicability of potassium silicate as a potash fertilizer. **Weihenstephan Illustriert**, v. 29, p. 699-702, 707-708, 1910a.

WEIN, E. Pot experiments with potassium silicate. **Deutsche Landwirtschaftliche Presse**, Berlin, v. 37, p. 145-146, 1910b.

WEIN, E. The use of potash silicate as a fertilizer. **Deutsche Landwirtschaftliche Presse**, Berlin, v. 36, p. 794-795, 807-808, 816-817, 1910c.

WEISMULLER, E. **Sodium or potassium silicate**. Patent GB0723794. 28 out. 1907.

WELDES, H. H.; LANGE, K. R. Properties of soluble silicates. **Journal of Industrial & Engineering Chemistry**, New York, v. 61, n. 4, p. 29-44, Apr. 1969.

WERNER, D. Silicate metabolism. In: _____. **The biology of diatoms**. Oxford: Blackwell, 1977. p. 110-149.

WERNER, D.; ROTH, R. Silica metabolism. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed.). **Encyclopedia of plant physiology: new series**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. v. 15B, p. 682-694.

WIESE, H.; NIKOLIC, M.; ROMHELD, V. Silicon in plant nutrition: effects on zinc, manganese and boron leaf concentrations and compartmentation. In: SATTELMACHER, B; HORST, W. J. (Ed.). **The apoplast of higher plants: compartment of storage, transport and reactions:** the significance of the apoplast for the mineral nutrition of higher plants. Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2007. p. 33-47.

WILD, A. **Russell's soil conditions and plant growth.** 11th ed. Harlow: Longman, 1988. 991p.

WINSLOW, M. D. Silicon, disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, Madison, v. 32, n. 5, p. 1208-1213, Sept./Oct. 1992.

XU, S. G.; ZHOU, J. M.; LIU, Y.; CHEN, N. C.; XIE, Z. Influence of several chemical fertilizer availability and chromium uptake by *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) in chromium-contaminated soil. **Nanjing Nongye Daxue Xuebao**, Nanjing, v. 30, n. 4, p. 52-57, 2007.

YAMAUCHI, M.; WINSLOW, M. D. Silica reduces disease on upland rice in a high rainfall area. **International Rice Research Newsletter**, Manila, v. 12, n. 6, p. 22-23, 1987.

YAN, Z. J.; ZHANG, Q. R.; YIN, W. R. Combined application of Si, Zn and Mn on growth of wheat and maize. **Soils and Fertilizers**, Beijing, v. 1, p. 46-48, 1996.

YANISHEVSKAYA, O.; YAGODIN, B. A. Effects of silica, manganese and chromium on the yield and some quality parameters of the vegetable crops. **Agrokhimya**, Moscow, v. 5, p. 47-51, 2000.

YILDIRIM, I.; IRSHAD, M. Investigations on the efficacy of some natural chemicals against powdery mildew (*Uncinula necator* (Schw.) Burr.) of grape. **Journal of Phytopathology**, Berlin, v. 150, n. 11/12, p. 697-702, 2002.

YIN, F. X.; WAN, H. Y.; MEI, R. L.; XIAN, L. C.; JIAN, Z. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of *Indocalamus barbatus* under simulated acid rain stress. **Chinese Journal of Applied Ecology**, Beijing, v. 19, n. 6, p. 1179-1184, 2008.

ZHANG, G. L.; DAÍ, Q. G.; HUO, Z. Y.; CHEN, W. J.; WANG, X.; XU, K.; SUO, G. R.; ZHANG, J.; LIU, J.; ZHANG, H. C. Exogenous application of sodium silicate improves the resistance of rice photosynthesis to *Rhizoctonia solani* infection. **Shengtai Xuebao**, Beijing, v. 28, n. 10, p. 4881-4890, 2008.

Embrapa

Agropecuária Oeste



**Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

