

## Adubação silicatada em cana-de-açúcar





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1517-1329

Dezembro, 2011

## **Documentos 165**

# **Adubação silicatada em cana-de-açúcar**

Anderson Carlos Marafon

Lauricio Endres

Aracaju, SE  
2011

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Av. Beira-mar, 3250, Caixa Postal 44, CEP 49001-970, Aracaju, SE

Tel (0\*\*79) 4009-1300

Fax (0\*\*79) 4009-1369

E-mail: sac@cpatc.embrapa.br

### **Comitê Local de Publicações**

Presidente: *Ronaldo Souza Resende*

Secretária-executiva: *Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues*

Membros: *Edson Patto Pacheco, Élio César Guzzo, Hymerson Costa Azevedo, Ivênio Rubens de Oliveira, Joézio Luiz dos Anjos, Josué Francisco da Silva Junior, Luciana Marques de Carvalho, Semiramis Rabelo Ramalho Ramos, Viviane Talamini*

Supervisão editorial: *Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues*

Normalização bibliográfica: *Josete Melo Cunha*

Tratamento das ilustrações: *Nathalie de Góis Paula*

Foto da capa: *Anderson Carlos Marafon*

Editoração eletrônica: *Nathalie de Góis Paula*

### **1ª Edição**

#### **Todos os direitos reservados.**

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

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Tabuleiros Costeiros

---

Marafon, Anderson Carlos

Adubação silicatada em cana-de-açúcar / Anderson Carlos Marafon, Laurício Endres. – Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011.

46 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1517-1329; 165).

Disponível em [http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes\\_2011/doc\\_165.pdf](http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_165.pdf)

1. Cana-de-açúcar. 2. Solo. 3. Solo - Fertilidade. 4. Solo - Adubação. 5. Fertilizante. I. Endres, Laurício. II. Título. III. Série.

# **Autores**

## **Anderson Carlos Marafon**

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Fisiologia Vegetal  
Pesquisador Embrapa Tabuleiros Costeiros  
Unidade de Execução de Pesquisa de Rio Largo  
Rio Largo-AL, anderson@cpatc.embrapa.br

## **Lauricio Endres**

Engenheiro Agrônomo,  
Doutor em Ciências Biológicas (Botânica)  
Professor Adjunto Universidade Federal de Alagoas  
Centro de Ciências Agrárias  
Rio Largo-AL, lauricioendres@hotmail.com

# Apresentação

O desenvolvimento de novas pesquisas com a cultura da cana-de-açúcar torna-se eminente para o Brasil, caso o mesmo queira se consolidar como líder mundial na importação e exportação de biocombustíveis, como o etanol, que podem ser extraídos desta cultura e gerar milhões de empregos no campo e na cidade.

A produtividade da cana-de-açúcar é regulada por diversos fatores de produção, dentre os quais se destacam: planta (variedade), solo (propriedades químicas, físicas e biológicas), clima (umidade, temperatura, insolação), práticas culturais (controle da erosão, plantio, erradicação de plantas invasoras, descompactação do solo), controle de pragas e doenças, colheita (maturação, corte, carregamento e transporte), entre outros.

Nos últimos anos, houve, no sistema de produção da cana-de-açúcar, um enorme avanço no melhoramento genético das variedades, permitindo o desenvolvimento de plantas adaptadas às mais variadas condições climáticas, com altas resistências a pragas e doenças e potencialmente mais produtivas. No entanto, as pesquisas na área de fertilidade do solo e nutrição de plantas foram subestimadas e relegadas a um segundo momento. Isto fez com que, mesmo que de posse de variedades altamente produtivas, aumentos consideráveis de produtividade não fossem alcançados, devido à falta de desenvolvimento de pesquisas capazes de gerar informações para nortear o manejo adequado dos solos para o pleno desenvolvimento destas variedades melhoradas.

Apesar de o silício (Si) ser um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre e estar presente em quantidades consideráveis na maioria dos solos, várias classes de solos, principalmente os arenosos, são pobres em Si solúvel nos horizontes superiores. Nessas condições, provavelmente, pode-se esperar resposta positiva para aplicação de Si na forma de fertilizantes, principalmente em plantas acumuladoras de Si, como é o caso da cana-de-açúcar, que apresenta grande capacidade de acúmulo de Si em seus tecidos, onde o teor do elemento pode se igualar ou até exceder os teores de macronutrientes.

Em um sistema de cultivo intensivo visando alta produtividade, se faz necessária uma adubação adequada e, neste sentido, o uso de fertilizantes silicatados, além de fornecer nutrientes e atuar como corretivo da acidez do solo, também traz outros benefícios como o aumento da resistência das plantas a estresses bióticos (pragas e doenças) e abióticos (presença de metais pesados, salinidade, seca, excesso de água, vento forte, geadas, etc). Em função destes benefícios, o Ministério da Agricultura, pelo Decreto Lei número 4954, aprovado em 14 de Janeiro de 2004, que dispõe sobre a legislação de fertilizantes, considerou o silício (Si) como um micronutriente benéfico.

Para suprir a necessidade de Si, podem ser utilizados resíduos vegetais (casca de arroz e bagaço de cana) ou as cinzas obtidas da queima dos mesmos para geração de vapor. Entretanto, estas fontes são liberação lenta no solo e insuficientes para atender à demanda por Si na agricultura. Por outro lado, subprodutos da indústria do ferro gusa e do aço, que são as escórias de siderurgia ricas em Si, podem atender essa demanda.

Se, por um lado, a reciclagem desses resíduos industriais pode contribuir para minimizar impactos ambientais das indústrias, que primam pela excelência na produção com qualidade, por outro, tem-se uma cultura responsiva e socio-economicamente importante para o Brasil que é a cana-de-açúcar, cultivada numa vasta área (8,4 milhões de hectares na safra 2011/12), grande parte em regiões de solos ácidos e com baixa fertilidade, principalmente sob condições tropicais. Assim, tem-se um cenário de dois setores primários de produção, que embora distintos, apresentam potencial de interação, pois, se de um lado, há disponibilidade de um produto com propriedades semelhantes aos corretivos e fertilizantes tradicionais, do outro, tem-se um setor de produção altamente dependente desses insumos. A interação destes dois setores aliada a preservação do meio ambiente imprime sustentabilidade aos sistemas de produção.

O silício (Si) ainda é pouco utilizado pela falta de oferta de fertilizantes silicatados em todas as regiões do Brasil, o que onera as despesas com transporte (frete), e também pelo fato de existir ainda uma falta de informação, tanto por parte dos técnicos quanto dos agricultores sobre a importância do Si na agricultura.

*Edson Diogo Tavares*  
Chefe-Geral da Embrapa Tabuleiros Costeiros



# Sumário

## Introdução

<b>O silício como nutriente benéfico às plantas.....</b>	<b>11</b>
<b>Silício nos solos.....</b>	<b>13</b>
Efeitos dos silicatos na correção da acidez do solo.....	14
Os silicatos no aumento da disponibilidade de nutrientes.....	15
<b>Legislação para fertilizantes e corretivos contendo silício (Si).....</b>	<b>16</b>
<b>Fontes comerciais de silício (Si).....</b>	<b>18</b>
O uso de escórias siderúrgicas como fertilizantes silicatados.....	20
<b>O silício na planta.....</b>	<b>22</b>
Efeitos dos silicatos na redução de estresses bióticos e abióticos.....	25
O silício na indução de resistência contra o ataque de doenças.....	25
O silício na indução de resistência contra o ataque de pragas.....	26
O silício na redução do estresse salino e hídrico.....	28
Silicatos na redução da toxicidade por alumínio (Al <sup>3+</sup> ).....	28
<b>O uso de silicatos na cultura da cana-de-açúcar.....</b>	<b>29</b>
Efeitos dos silicatos na correção do solo e no aumento da produtividade.....	30
Efeitos do Si na redução de pragas e doenças em cana-de-açúcar.....	32

O Si na redução do estresse salino e hídrico em cana-de-açúcar.....	35
<b>Considerações finais.....</b>	<b>36</b>
<b>Referências</b>	

# Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma gramínea perene pertencente à tribo Andropogoneae e à família Poaceae. É uma planta do metabolismo C4, assim chamada por formar compostos orgânicos com quatro carbonos durante o processo fotossintético. A cultura produz, em curto período, alto rendimento de matéria seca, energia e fibras, sendo considerada uma planta de alta eficiência fotossintética, devido à sua adaptação às condições de alta intensidade luminosa, alta temperatura e relativa escassez de água (SEGATO et al., 2006).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com produção estimada em 588,9 milhões de toneladas na safra 2011/12, o que corresponde a aproximadamente 42% da produção mundial que, por sua vez, totaliza cerca de 1.500 milhões de toneladas e está localizada predominantemente na faixa tropical do planeta, em países da América Latina, da África e do Sudeste Asiático. No Brasil, aproximadamente 90% da cana-de-açúcar é produzida na região Centro-Sul do país e os outros 10% na região Nordeste. O Estado de Alagoas é o sexto maior produtor nacional e o maior produtor dessa cultura na região Nordeste, com área cultivada de 450,75 mil hectares (5,34% da área nacional) (CONAB, 2011), produção de 2,5 milhões de toneladas de açúcar e 715.357 milhões de litros de etanol na safra 2010/11, o que representou crescimento de 19,06% e 14,34%, respectivamente, em comparação com a safra anterior (SINDAÇUCAR, 2011).

Inicialmente, a cana-de-açúcar era utilizada quase que exclusivamente para a produção de açúcar, porém, nas últimas três décadas, tornou-se um novo paradigma de energia limpa e renovável, contribuindo decisivamente para a sustentabilidade do planeta e na luta contra o aquecimento global, já que é a matéria-prima mais eficiente na produção de etanol, obtido do caldo, e de bioeletricidade, obtida da biomassa do bagaço (resíduo fibroso) e da palha (pontas e folhas) (UNICA, 2011).

O cultivo da cana-de-açúcar vem se expandindo muito no Brasil, todavia, em regiões tradicionalmente canavieiras, como a dos Tabuleiros Costeiros e da Zona da Mata do Nordeste, que dispõem de poucas áreas para expansão, torna-se imprescindível o manejo eficiente da cultura para aumentar a produtividade. Neste sentido, os estados do Nordeste vêm obtendo aumentos na sua produção, motivados, principalmente, por incrementos de produtividade decorrentes do emprego de novas tecnologias, a exemplo da irrigação, do manejo do solo e das plantas e, principalmente, da adoção de novas variedades. Dentre os principais problemas enfrentados pela cultura nestas regiões, destaca-se a questão da correção da acidez associada à fertilidade do solo e a nutrição mineral, que interferem diretamente na eficiência produtiva das plantas.

A produção agrícola em busca de produtividade crescente exige o uso de corretivos e fertilizantes em quantidades adequadas, de forma a atender a critérios racionais que permitam conciliar o resultado econômico positivo e a conservação do solo e do meio ambiente, bem como a elevação constante da produtividade das culturas. Isso não pode ser conseguido com a adoção de práticas de manejo generalizadas, ignorando as particularidades dos solos de diferentes locais (RAIJ, 2011). No Brasil, o cultivo de cana-de-açúcar ocupa grande extensão territorial, sendo realizado em vários tipos de solos, sob influência de diferentes climas. É importante salientar que vários fatores podem interferir na produção e maturação da cultura, sendo os principais as interações edafoclimáticas, o manejo da cultura e a cultivar escolhida (DIAS, 1997).

Grande parte da área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil localiza-se em áreas com problemas de acidez do solo, resultantes na maioria das vezes, do processo de acidificação progressiva dos solos, principalmente em se tratando de solos de regiões tropicais (FREIRE et al., 2007), a exemplo dos Tabuleiros Costeiros e da Zona da Mata da região Nordeste (PRADO; FERNANDES, 2001a). De acordo com Koffler (1986), estima-se que no Brasil 70% das áreas cultivadas se encontrem em solos ácidos, com baixa disponibilidade de bases trocáveis. É nessa condição de acidez que o cultivo da cana-de-açúcar está presente com cerca de 8 milhões de hectares cultivados no Brasil na safra 2010/2011 e com demanda projetada para ampliar esse quadro para 11 milhões de hectares para a safra 2017/18 (AGRIANUAL, 2008). Nessas regiões, faz-se necessário a adoção da calagem, que proporciona benefícios como o fornecimento de cálcio e magnésio, a correção da acidez do solo, a neutralização dos elementos tóxicos como o alumínio e o manganês e o aumento da disponibilidade de nutrientes.

O aumento da eficiência das adubações, com melhoria do ambiente radicular, reveste-se de particular importância, principalmente no caso da cana-de-açúcar, na qual os fertilizantes são responsáveis por 20 a 25% do custo total de produção, colocando a cultura como consumidora de 16,3% dos fertilizantes comercializados no Brasil. Segundo dados da ANDA (2000), a cultura canavieira consome 1,6 milhão de toneladas de fertilizantes, anualmente. Neste contexto, além dos aspectos econômicos também estão envolvidos aspectos socioambientais, em decorrência do uso indiscriminado de adubos químicos, que pode acarretar contaminação de lençóis freáticos.



# Adubação silicatada em cana-de-açúcar

---

*Anderson Carlos Marafon*

*Laurício Endres*

## O silício como nutriente benéfico às plantas

O silício ( $\text{Si}^{14}$ ) é o segundo elemento mais abundante da superfície terrestre, superado apenas pelo oxigênio. Ocorre principalmente como mineral inerte das areias, quartzo ( $\text{SiO}_2$  puro), caulinita, micas, feldspatos e em outros argilominerais silicatados (MARSCHNER, 1995). O Si tem sido utilizado na forma de fertilizantes em vários países, como Brasil, Japão, Ilhas Maurícius, Estados Unidos (EUA), Austrália e África do Sul. No Japão, já se utiliza esse elemento no cultivo de arroz há seis décadas. Os EUA incorporaram a adubação com Si nas culturas do arroz e da cana-de-açúcar, utilizando, principalmente, o silicato de cálcio e magnésio, um subproduto da indústria siderúrgica e da produção de fósforo elementar (RODRIGUES et al., 2011). Na Flórida (EUA), mais de 150.000 toneladas de silicato de cálcio são anualmente utilizadas nas culturas do arroz e da cana-de-açúcar (KORNDÖRFER; OLIVEIRA, 2010).

Embora não seja considerado um nutriente essencial, o silício (Si) é o elemento mais absorvido pela cana-de-açúcar, seguido por potássio (K), nitrogênio (N), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (TISDALE et al., 1993). A acumulação de Si em plantas como a cana-de-açúcar pode resultar em aumento da produtividade, provavelmente, devido à redução da transpiração e melhoria na estrutura da planta, como mostra o trabalho de Silveira Junior et al. (2003), que compara o efeito do silicato de cálcio ao do calcário.

Os efeitos benéficos do Si às plantas estão relacionados, principalmente, com o aumento da resistência ao ataque de insetos-praga, nematóides e doenças e à diminuição da taxa de transpiração através do controle do mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995; KORNDÖRFER et al., 2002), com maior tolerância à falta de água durante os períodos de baixa

umidade do solo. Além destes, o uso de Si na adubação tem mostrado outros benefícios, incluindo: amenização dos efeitos do excesso de metais pesados (alumínio, manganês e ferro) e do estresse salino (SAVANT et

al., 1999), aumentos na eficiência fotossintética (NASCIMENTO et al., 2009), no suprimento de carboidratos, na assimilação de amônia, na tolerância a adubações pesadas com nitrogênio e na força mecânica dos colmos (com decréscimo na suscetibilidade ao acamamento devido ao fortalecimento das paredes celulares e a maior rigidez estrutural dos tecidos), melhoria na arquitetura das plantas (com aumento na penetração de luz no dossel em função do crescimento mais ereto das folhas e a redução do auto-sombreamento) (SAVANT et al., 1999; TAKAHASHI, 1995), no aumento do perfilhamento e dos teores de clorofila das folhas, com redução da senescência foliar (PRADO; FERNANDES, 2000) e, também, na proteção das folhas contra os danos causados pela radiação ultravioleta (TISDALE et al., 1993).

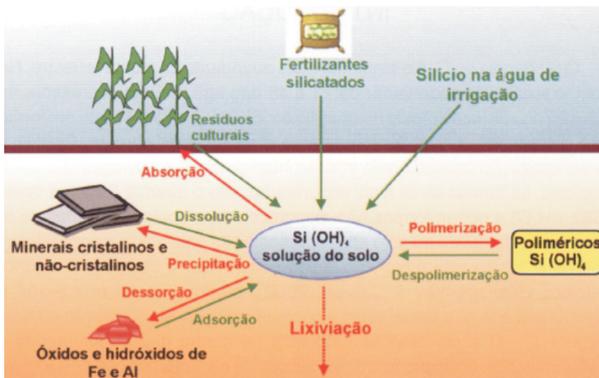
Os benefícios proporcionados pelos silicatos às plantas são observados com maior frequência em solos pobres em Si e em anos com adversidades, como veranicos ou períodos secos prolongados, geada, alta incidência de pragas e/ou doenças. Sob tais condições, a planta bem nutrida com silício tolera por um período maior a falta de água, pois usa melhor água absorvida e perde numa velocidade menor em relação à planta com baixo teor de silício. Se, por um lado, os benefícios oferecidos pelo Si refletem em melhorias na qualidade tecnológica e aumento da produtividade da cultura, por outro, a falta do elemento pode diminuir a capacidade biológica das plantas em resistir às condições ambientais adversas (RAFI et al., 1997).

A deposição de Si nas folhas das plantas contribui para: melhorar a distribuição e prevenir a toxidez por Mn nos tecidos, reduzir a perda de água por transpiração, reduzir efeitos adversos causados pelo excesso de nitrogênio e aumentar a resistência à estresses bióticos (MA; TAKAHASHI, 2002). Os silicatos promovem a resistência das plantas às condições de estresse salino e/ou hídrico, garantindo a integridade e estabilidade da membrana celular (ZUCARRINI, 2008). Além de reduzir a transpiração das folhas, o acúmulo de Si torna-as mais eretas e rígidas, favorecendo a interceptação de luz e o aumento da eficiência fotossintética e do uso da água (MARSCHNER, 1995).

## Silícios nos solos

Nos solos, o silício solúvel ou disponível às plantas tem origem nos processos de intemperização dos minerais primários e, particularmente, dos minerais secundários como os argilo-silicatos. O silício (Si) está presente na solução do solo como ácido silícico ou monossilícico ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ), em grande parte na forma não-dissociada ( $\text{pK}_1 = 9,6$ ), que é facilmente absorvida pela planta. De modo geral, as soluções dos solos apresentam teores de Si dissolvidos variando entre 2,8 e 16,8  $\text{mg L}^{-1}$ , sendo que, o equilíbrio dinâmico do elemento no solo depende do pH (EPSTEIN, 1999).

Dentre as principais fontes de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  presentes na solução do solo citam-se: a decomposição de resíduos vegetais, a dissociação do ácido silícico polimérico, a liberação de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, a dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos, a adição de fertilizantes silicatados e a água de irrigação. Os principais drenos de silício incluem a precipitação do  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  em solução formando minerais, a polimerização do ácido silícico, a lixiviação, a adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al e a própria absorção pelas plantas (LIMA FILHO et al., 1999) (Figura 1).



**Figura 1.** Fatores que governam a concentração de Si na solução do solo. Fonte: Savant et al. (1999).

Solos tropicais e subtropicais, submetidos ao manejo intensivo e à monocultura, sujeitos à intemperização e lixiviação, normalmente, apresentam altos teores de alumínio (Al), baixa saturação por bases, alta capacidade de fixação de P e altos índices de acidez (MATICHENKOV; CALVERT, 2002). A acidificação,

liberação de íons  $H^+$  na solução do solo, ocorre devido ao mecanismo antiporte, que é a absorção de cátions (principalmente  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$ ) e a exsudação do  $H^+$  pelas plantas, visando manter o equilíbrio iônico no interior das células das raízes (TAIZ; ZEIGER, 2009), bem como, em função da acidificação natural do próprio solo pela presença de  $CO_2$  e água. Com o passar dos anos, ocorrem reduções nos valores de pH, na capacidade de troca de cátions e na saturação por bases do solo, fatos que colaboram para diminuir a produtividade da cultura, em decorrência da depreciação da fertilidade do solo (RAIJ, 1996).

De acordo com Epstein (1999), solos tropicais e subtropicais, tendem a apresentar, além da acidificação progressiva, baixos níveis de Si, devido ao processo de 'dessilicificação'. O manejo intensivo do solo e a monocultura, como é o caso da cultura da cana-de-açúcar são sistemas que conduzem à um rápido esgotamento do Si disponível no solo. Nestes tipos de solo, a adubação silicatada pode influenciar na melhoria das propriedades químicas e na fertilidade. Portanto, solos cultivados com cana-de-açúcar podem se beneficiar da adubação silicatada, principalmente, nas regiões onde o elemento esteja limitando o crescimento e a produção das plantas (FOY, 1992).

Os solos argilosos apresentam maior quantidade de filossilicatos (minerais de argila que liberam Si e  $Al^{3+}$ ) e maior quantidade de Si em solução quando comparados aos arenosos, apesar destes serem ricos em quartzo ( $SiO_2$ ), já que este é um mineral de difícil decomposição química (DEMATTÊ et al., 2011). Berthelsen et al. (2002) classificaram os solos quanto ao teor de silício extraído com  $CaCl_2$  0,01 mol  $L^{-1}$  em quatro classes: 1 - muito baixa (0-5 mg  $kg^{-1}$ ); 2 - baixa (5-10 mg  $kg^{-1}$ ), 3 - limitante (10-20 mg  $kg^{-1}$ ) e 4 - adequada ( $> 20$  mg  $kg^{-1}$ ) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Korndörfer et al. (1999) classificaram os níveis de silício no solo, extraído em ácido acético 0,5 mol  $L^{-1}$ , como: baixo ( $< 6$  mg  $dm^{-3}$ ), médio (de 6 a 24 mg  $dm^{-3}$ ) e alto ( $> 24$  mg  $dm^{-3}$ ). Os níveis críticos de Si em solos cultivados com cana-de-açúcar são de 20 mg  $kg^{-1}$  extraídos com ácido acético 0,5 mol  $L^{-1}$  e de 6 a 8 mg  $kg^{-1}$  com  $CaCl_2$  0,01 mol  $L^{-1}$ .

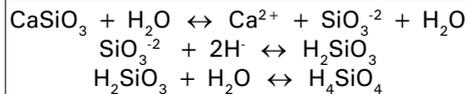
## **Efeitos dos silicatos na correção da acidez do solo**

No Brasil, o material mais utilizado como corretivo de acidez do solo é o calcário. Todavia, uma provável solução para o mecanismo de acidificação do solo é a aplicação superficial de outros corretivos, entre eles os silicatos de cálcio e magnésio, com a finalidade de aumentar a produtividade e a longevidade dos

canaviais. A redução do declínio da produção da cana-de-açúcar pode significar aumento do número de cortes antes do replantio, o que é extremamente importante do ponto de vista econômico.

Os silicatos têm, no solo, comportamento similar aos carbonatos de cálcio e de magnésio, promovendo reações químicas semelhantes às provocadas pelo calcário, tais como: aumento do pH, precipitação do Al e Mn tóxicos, aumento dos teores de Ca e Mg trocáveis e da saturação de bases e redução na saturação por  $Al^{+3}$ , além do benefício adicional de aumentar os teores de Si no solo (EPSTEIN, 1999; SAVANT et al., 1999).

Os fertilizantes silicatados são normalmente neutros a ligeiramente alcalinos. De acordo com Savant et al. (1999), o efeito corretivo na acidez do solo promovido pelos silicatos acontece pelas reações dos ânions  $SiO_3^{-2}$  com os prótons  $H^+$  na solução do solo:



## Os silicatos no aumento da disponibilidade de nutrientes

Além do fornecimento de nutrientes (cálcio, magnésio e silício) ao solo, outro aspecto importante das investigações dos efeitos de silicatos sobre as propriedades do solo diz respeito à sua interação com o fósforo e com a adubação NPK. Lima-Filho et al. (1999) afirmaram que o uso de fertilizantes silicatados aumenta a eficiência da adubação NPK. Os silicatos apresentam boas propriedades de adsorção e promovem menor lixiviação de  $K^+$  e de outros nutrientes móveis no solo.

De acordo com Matichenkov e Calvert (2002), os fertilizantes silicatados adsorvem o fósforo solúvel (P), diminuindo a sua lixiviação em cerca de 40 a 90%, sem diminuir sua disponibilidade às plantas, visto que o elemento é mantido em formas trocáveis na superfície dos silicatos. A adubação silicatada aumenta a concentração de P no solo ao deslocar o P fixado nos óxidos de Fe e Al, através da saturação dos sítios de absorção de P (PRADO; FERNANDES, 2001b). Os fertilizantes silicatados têm a capacidade de aumentar a disponibilidade de P no solo, por meio do deslocamento do P adsorvido na superfície dos sesquióxidos

(LIMA FILHO, 2009). Este aumento na disponibilidade de P pode ocorrer devido a competição dos ânions  $\text{SiO}_4^{-3}$  com os ânions  $\text{PO}_4^{-3}$  pelos mesmos sítios de adsorção (KATO; OWA, 1997).

Os silicatos também aumentam a tolerância das plantas às adubações pesadas com nitrogênio (N). Mauad et. al. (2003) utilizando a adubação nitrogenada combinada com a adubação silicatada observaram um aumento no teor de Si foliar quando se aplicou a menor dose de N. Isto se deve, provavelmente, à competição que existe entre os íons  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  e o  $\text{NO}_3^-$  pelos sítios de absorção da planta (WALLACE, 1989).

## Legislação para fertilizantes e corretivos contendo silício (Si)

No Brasil, o Si foi recentemente incluído como micronutriente benéfico na Legislação para Produção e Comercialização de Fertilizantes e Corretivos, conforme o Decreto Lei nº. 4.954, de 14 de janeiro de 2004, autorizando a sua comercialização de forma isolada ou em mistura com outros nutrientes (SENA; CASTRO, 2010). Pela Instrução Normativa nº. 5, de 23 de fevereiro de 2007, no Anexo II, foram aprovados para comercialização os produtos fertilizantes minerais contendo Si (MAPA, 2011).

Os produtos que contêm silício devem atender exigências específicas, podendo ser enquadrados, de acordo com a legislação vigente, como: fertilizante mineral simples (escória silicatada, silicato de cálcio, silicato de cálcio e magnésio, solução de silicato de potássio e termofosfato magnesiano potássico) (**Tabela 1**), fertilizante mineral misto, fertilizante mineral complexo, fertilizante organomineral ou como corretivo de acidez.

**Tabela 1.** Especificações dos fertilizantes minerais simples contendo silício (Si), aprovados pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para uso no Brasil.

Fertilizante	Garantia Mínima	Características	Obtenção	Observação
Escória silicatada	10% de Si 10% de Ca	Silício total na forma de silicato; Cálcio total. Especificação granulométrica: Pó	A partir do tratamento e moagem de escórias silicatadas (agregado siderúrgico) geradas no processo de produção de ferro e do aço.	Pode ser comercializada nas demais especificações granulométricas, desde que seja produzido a partir do produto em pó. Apresenta características como corretivo de acidez e pode conter magnésio.
Silicato de Cálcio	20% de Si 29% de Ca	Silício total na forma de silicato de cálcio	A partir da moagem e do tratamento térmico, com monitoramento diário da temperatura (mínimo 1000°C), de silicato de cálcio e/ou outros compostos silicatados	Pó, farelado, farelado fino e granulado. Apresenta também características como corretivo de acidez.
Silicato de Cálcio e Magnésio	10% de Si 7% de Ca 1% de Mg	Si total na forma de silicato de cálcio. Magnésio total	1) Tratamento e moagem de escórias geradas na produção de ferro e aço. 2) Moagem e tratamento térmico, com monitoramento diário da temperatura (> 1000°C), de compostos silicatados com dolomíticos.	Pó, farelado, farelado fino e granulado. Apresenta também características como corretivo de acidez.
Solução de Silicato de Potássio	10% de Si 10% de K <sub>2</sub> O	Si e K solúveis em água	Reação de minerais silicatados com Hidróxido de Potássio	

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Fertilizante	Garantia Mínima	Características	Obtenção	Observação
Termofosfato Magnésiano Potássico	12% de $P_2O_5$ , 4% de $K_2O$ , 16% de Ca 7% de Mg 10% de Si	Fósforo ( $P_2O_5$ ) e Potássio ( $K_2O$ ) solúveis em ácido cítrico (2%) na relação de 1:100. Teores totais de Ca, Mg e Si. Granulometria: Pó e Farelado Fino.	A partir do tratamento térmico a, no mínimo, 1000°C (fusão), do Fosfato Natural ou concentrado apatítico com adição de compostos Magnésianos, Potássicos e Silícios.	Apresenta também características como corretivo de acidez.

Fonte: MAPA, 2011.

Todos os fertilizantes minerais simples contendo silício, com exceção da solução de silicato de potássio, possuem características de corretivos de acidez. Isso quer dizer que, para esses produtos também poderão ser garantidos teores de óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO), além do poder de neutralização e do poder relativo de neutralização total (PRNT). Neste sentido, para que um fabricante de fertilizantes mencione que seu produto também possui características de corretivo de acidez, ele deverá garantir um valor mínimo de PN de 67% de equivalente em carbonato de cálcio ( $E CaCO_3$ ) e a soma de CaO e MgO deverá ser de, pelo menos, 38%, conforme artigo 3º do Anexo da Instrução Normativa SDA nº 35/2006 (SENA; CASTRO, 2010).

A especificação granulométrica dos corretivos é, normalmente, "pó". Para esta especificação, são exigidas as seguintes características físicas: (1) passante de 100% na peneira de 2,0 mm (ABNT nº 10); (2) passante mínimo de 70% na peneira de 0,84 mm (ABNT nº 20) e (3) passante mínimo de 50% na peneira de 0,3 mm (ABNT nº 10).

## Fontes comerciais de silício

As principais fontes de Si, além do próprio solo, são os silicatos. Um número grande de materiais tem sido utilizado como fonte de silicatos para as plantas, entre eles podem ser citados: escórias de siderurgia, wollastonita, subprodutos da produção de fósforo elementar, silicatos de cálcio, sódio, potássio e magnésio (serpentinito), cimento e termofosfato (LIMA FILHO et al., 1999). As principais

fontes comerciais de silicatos disponíveis no mercado brasileiro são listadas abaixo (**Tabela 2**).

**Tabela 2.** Teores de silício total e solúvel, óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) e poder de neutralização (PN) de algumas fontes comerciais de Si.

Fonte de Si	Origem	Teor de Silício (%)		% CaO	%MgO	% PN**
		Total	Solúvel*			
Wollastonita	Vanzil	51,9	30,1	42,4	0,2	76,4
Alto-forno	Mannesman	38,4	6,7	30,1	7,5	72,6
Forno LD	Mannesman	12,3	33,1	40,9	7,3	91,3
Escória de P	Rhodia	46,1	39,0	43,5	0,7	79,6
MB-4	MIBASA	48,0	1,8	2,2	19,1	51,5
Alto-forno	CSN	33,4	5,1	42,5	5,2	89,1
Forno LD	CSN	10,9	4,5	28,2	7,6	69,3
Forno LD	Belgo	17,4	27,1	39,5	9,6	94,4
Forno elétrico	Siderme	18,8	40,7	25,7	12,6	77,2
Escória de aço inoxidável	Agrosilfício®	23,2	43,4	41,0	11,0	100,7
	Harsco Minerais					
Forno LD	Açominas	11,2	21,0	27,6	2,9	56,5
Subproduto Magnesiano	Rima - SILMAG	24,00	53,0	55,00	12,0	103,0

\*Percentual do Si total solúvel em  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$ . \*\* Equivalente em  $\text{CaCO}_3$

Fonte: Korndörfer (2007).

Além destas fontes, são encontrados outros produtos comerciais no mercado nacional, incluindo soluções fluídas e rochas silicatadas, dentre os quais podem ser citados: Silifértil® (Silifértil Ambiental Ltda.), Microton® (Estelar Com. & Ind. de Imp. e Exp. Ltda.), Siligran® (Fertion Indústria de Fertilizantes Ltda.), Termofosfato Yoorin® (Yoorin Fertilizantes Ltda.), Siligesso® (Agronelli Insumos Agrícolas Ltda.), Sili-K® (Unaprosil Ind. Com. de Prod. Químicos Ltda.), Itafértil® (Mineração São Judas Ltda.) e Sifol® (Wox Agrociência Comercial Ltda.) (REIS et al., 2007).

As características consideradas ideais para uma boa fonte de silicato para fins agrícolas são: alta concentração de Si solúvel, boas propriedades físicas, facilidade para aplicação mecanizada, pronta disponibilidade às plantas, boa

relação e quantidades de Ca e Mg, baixa concentração de metais pesados e baixo custo (PRADO et al., 2001).

No processo de escolha da fonte de silicato, deve-se considerar o poder relativo de neutralização total (PRNT) e a distância entre a siderúrgica e a propriedade (local de aplicação). Assim, a análise da relação custo/benefício irá determinar a viabilidade ou não da aplicação do silicato em substituição ao calcário (KORNDORFER et al., 2004a). Um dos principais problemas do uso agrícola das escórias são os seus locais de produção, muitas vezes distantes dos locais de utilização, que encarece o custo do produto. Apesar da reconhecida importância agrônômica da escória de siderurgia na produção e longevidade do canavial (RAID et al., 1992), existem poucos estudos econômicos comparativos envolvendo esta questão, relatados na literatura.

Os silicatos são aplicados no solo principalmente na forma sólida (pó ou granulado), mas também podem ser aplicados na forma líquida (via solo ou foliar). Enquanto os silicatos em pó são incorporados em área total, os granulados são aplicados em linha, juntamente com outras matérias primas na composição de adubos NPK. Isto favorece o suprimento de Si próximo ao sistema radicular e sua absorção pela planta.

## **O uso de escórias siderúrgicas como fertilizantes silicatados**

A utilização de resíduos siderúrgicos tem se demonstrado uma alternativa viável para a correção da acidez do solo, destacando-se as escórias de siderurgia - subprodutos da indústria do ferro e do aço - que são fontes abundantes e baratas de silicatos, tendo como constituintes principais os silicatos de cálcio e de magnésio (MALAVOLTA et al., 2002). As escórias são originadas do processamento em altas temperaturas, geralmente acima de 1400° C, resultantes da reação do calcário com a sílica presente no minério de ferro (MADEIROS et al., 2009; PRADO et al., 2001).

O Brasil é o sexto maior produtor mundial de ferro-gusa com produção anual de cerca de 25 milhões de toneladas, gerando por volta de 6,25 milhões de toneladas de escória. As escórias siderúrgicas apresentam grande potencial comercial em virtude do expressivo parque siderúrgico nacional que é composto por 28 usinas, distribuídas, majoritariamente, nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo. Para que seja usada na agricultura como

fertilizante ou corretivo de solo, a escória depende de seu registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), atendendo os requisitos previstos em legislação (LIMA FILHO, 2011).

As escórias são subprodutos ricos em Si e nos óxidos de cálcio e magnésio, constituindo-se em excelentes fontes de nutrientes a baixo custo, além de atuarem como corretivos da acidez do solo devido ao seu caráter básico, especialmente, em solos arenosos e de baixa fertilidade (DATNOFF, 2001). A ação dos silicatos é muito similar ao calcário, sendo, porém, seis vezes mais solúvel que este. Segundo Alcarde (1992), o silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) é 6,78 vezes mais solúvel do que o carbonato ( $\text{CaCO}_3$ ), característica que o torna mais favorável na ação corretiva do pH, principalmente em culturas semi-perenes, como é a cana-de-açúcar. Isso significa que, em aplicações em superfície, onde não se realiza a incorporação, por exemplo, em áreas de cana crua ou em soqueiras, a ação dos silicatos na melhoria da fertilidade dos solos pode ser mais rápida que a do calcário. Como as escórias têm, na sua composição química, silicatos de reação lenta no solo, com efeito residual relativamente longo, recomenda-se que a aplicação seja feita em torno de um mês antes do plantio da cana-de-açúcar.

A solubilidade do Si nos diferentes tipos de escórias siderúrgicas pode variar de acordo com a granulometria, a dosagem e o tipo de solo. A granulometria fina dos agregados permite sua maior reatividade. As escórias de alto forno, normalmente, apresentam maiores teores de Si (36 a 42%), porém, de baixa solubilidade. Já, as escórias de aciaria apresentam teores inferiores (12 a 22%), entretanto, de maior solubilidade, devido à maior proporção de sílica amorfa (PRADO et al., 2001).

Tendo em vista as condições de acidez dos solos brasileiros, recomenda-se definir a quantidade de escória de siderurgia a aplicar baseado no método de saturação por bases, objetivando elevá-la para 80%, o que deverá apresentar efeito residual suficiente para todo o ciclo da cultura (PRADO et al., 2001). Apesar de não existir ainda um critério de recomendação de doses, baseado em estudos de calibração das análises de Si solúvel no solo e na produtividade da cana-de-açúcar, bem como sobre o efeito residual dos silicatos, dados disponíveis indicam que as doses aplicadas devem variar entre 3 e 6 toneladas de escória por hectare.

Alguns autores alertam sobre a presença de metais pesados, potencialmente tóxicos, presentes na escória de siderurgia e seu potencial de contaminação

do ambiente (DEFELIPO et al., 1992). A Legislação Brasileira para Produção e Comercialização de Fertilizantes e Corretivos estabelece que, além das garantias mínimas exigidas (10% de Si e 10% de Ca), as escórias siderúrgicas devem apresentar teores máximos de 20 mg Kg<sup>-1</sup> de cádmio (Cd) e de 1.000 mg Kg<sup>-1</sup> de chumbo (Pb) (SENA; CASTRO, 2010).

Quanto ao potencial tóxico das escórias, a literatura apresenta poucos resultados experimentais, mesmo para as mais comuns, como as de alto-forno e de aciaria. Em um levantamento amplo sobre o potencial de poluição ambiental de fertilizantes, corretivos e resíduos industriais com metais pesados realizado por Malavolta (1994), conclui-se que o uso desses produtos, nas dosagens e modos recomendados, não elevou os teores desses elementos no solo e na planta a níveis indesejáveis a curto, médio e longo prazo. Sobral et al. (2011) também constataram que, com a aplicação 4 t ha<sup>-1</sup> de escória no sulco de plantio não houve aumento na disponibilidade de metais pesados em um argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar.

## O silício na planta

A família das gramíneas (*Poaceae*), que inclui importantes culturas como arroz, cana-de-açúcar, milho e trigo, apresenta grande capacidade de acumular silício (Si), a qual varia de acordo com o genótipo considerado (BARBOSA FILHO et al., 2001). Nessas culturas, o teor de Si pode se igualar ou até mesmo exceder os teores de macronutrientes primários (EPSTEIN, 1999; RAFI et al., 1997). Plantas, de um modo geral, contêm quantidades de Si variando de 0,1 a 10% do total de sua matéria seca. São consideradas acumuladoras de Si, aquelas que possuem teores foliares superiores a 1% da massa seca e, não acumuladoras, as com teores menores que 0,5% (MA et al., 2001).

O Si é absorvido pelas raízes das plantas na sua forma neutra, como ácido monossilícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>), através de um processo passivo regulado pela transpiração, via xilema, juntamente com a água (fluxo de massa), ou por um processo ativo, através de transportadores específicos situados na membrana plasmática das células das raízes. O transporte a longa distância nas plantas é limitado aos vasos do xilema e grandes quantidades de Si são depositadas na parede celular desses vasos. Este fato pode ser importante para prevenir a compressão dos vasos xilemáticos quando a taxa de transpiração é elevada. O Si absorvido se acumula nos tecidos mais velhos da planta, principalmente nas paredes das

células da epiderme, como ácido monossilícico polimerizado ou sílica amorfa ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), que contribui substancialmente para o fortalecimento da estrutura da planta (MITANI; MA, 2005). Recentemente, foram identificados transportadores envolvidos na absorção e transporte de silício em arroz, cevada e milho. Dois tipos de transportadores (influxo e efluxo) estão envolvidos na absorção de Si pelas raízes. Outro transportador, localizado nas células do parênquima do xilema da folha é responsável pelo descarregamento do Si (MA; YAMAJI, 2008).

O Si se concentra nos tecidos de suporte do caule e nas folhas, podendo ainda ser encontrado em pequenas quantidades em grãos. Em geral, o conteúdo médio de Si nas raízes é de um décimo da concentração encontrada no caule e nas folhas, entretanto, no caso da soja, por exemplo, o teor de Si na raiz é maior do que nas folhas. Nas gramíneas em geral, a concentração de Si é maior na parte aérea do que nas raízes, com maiores teores nas folhas velhas do que nas novas e na parte basal do que na apical da planta (EPSTEIN, 1999). O acúmulo de Si se dá principalmente no lúmen das células epidérmicas, formando corpos chamados 'fitólitos' que, uma vez depositados, são imobilizados e não mais se redistribuem pela planta, razão pela qual o Si ocorre em maiores concentrações nos tecidos mais velhos (KIM et al., 2002). A deposição ocorre com maior frequência nas regiões de máxima transpiração, como a epiderme foliar junto às células-guarda dos estômatos, tricomas e espinhos (DAYANANDAM et al., 1983).

As plantas diferem bastante quanto à sua capacidade de absorver Si, sendo que, até mesmo genótipos de uma mesma espécie podem apresentar diferentes concentrações em seus tecidos, havendo, portanto, grande variabilidade na capacidade genética das cultivares em acumularem este elemento (MA et al., 2001). Neste sentido, as variedades de cana-de-açúcar apresentam variabilidade genética quanto ao acúmulo de Si nos seus tecidos, ocorrendo estreita relação entre os teores de Si na folha e no solo (DEREN et al., 1993). Korndörfer et al. (2000) encontraram teores foliares de 0,76, 1,04 e 1,14% nas variedades RB 72-454, SP 79-1011 e SP 71-6163, respectivamente.

As concentrações de Si na cana-de-açúcar podem variar desde valores muito baixos em folhas jovens (0,14%) até valores muito altos em folhas velhas (6,7%) (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995). Korndörfer et al. (1999) classificaram os teores foliares de Si da cana-de-açúcar em: baixo ( $< 17 \text{ g kg}^{-1}$ ), médio ( $17 \text{ a } 34 \text{ g kg}^{-1}$ ) e alto ( $> 34 \text{ g kg}^{-1}$ ). Anderson e Bowen (1992) consideraram que, as concentrações foliares de Si tidas como adequadas para a obtenção de boas

produtividades no cultivo da cana-de-açúcar são aquelas superiores a 10 g kg<sup>-1</sup> matéria seca na folha + 1.

Segundo Elawad et al. (1982), quando as lâminas foliares da cana-de-açúcar contêm menos que 1% de Si a planta pode apresentar redução no crescimento, perfilhamento escasso, senescência prematura de folhas, falhas na brotação e sintomas de deficiência nas folhas diretamente expostas aos raios solares. Segundo Anderson e Bowen (1992) e Orlando Filho et al. (1994), os sintomas de deficiência de Si em folhas de cana-de-açúcar são caracterizados por pequenas manchas brancas circulares (sardas) nas folhas mais velhas, sintoma conhecido como *leaf freckling* (Figura 2).



**Figura 2.** Sintomas característicos de deficiência de silício (Si) nas faces abaxial (a) e adaxial (b) de folha de cana-de-açúcar cv. RB 92579 cultivada no município de Coruripe/AL. Créditos: Anderson Carlos Marafon, 2011.

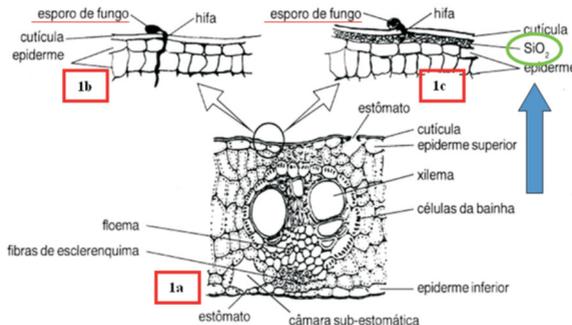
Matichenkov e Calvert (2002) associaram as altas produtividades de colmos em cana-de-açúcar às altas concentrações de Si nas folhas. De acordo com Korndörfer et al. (2004b), a extração média de Si por essa cultura é de 250 Kg ha<sup>-1</sup> e os teores médios encontrados nos tecidos variam de 0,33 a 0,5% no bagaço e de 0,7 a 1,9% nas folhas.

## Efeitos dos silicatos na redução de estresses bióticos e abióticos

O silício tem papel importante nas relações planta-ambiente, pois pode dar às culturas melhores condições para suportarem adversidades edafoclimáticas e biológicas, atuando como um antiestressante natural que proporciona maior produção e melhor qualidade ao produto final (LIMA FILHO, 2009). A deposição de Si junto à cutícula das folhas confere proteção e ameniza os efeitos de estresses de natureza biótica e/ou abiótica (DAYANANDAM et al., 1983). O uso de silicatos pode proporcionar maior resistência das plantas ao ataque de pragas, doenças e nematóides, bem como amenizar os efeitos do estresse hídrico em épocas de escassez de água.

## O silício na indução de resistência contra o ataque de doenças

Os mecanismos de resistência das plantas às pragas e doenças, conferidos pelo Si, são decorrentes de sua associação com os constituintes da parede celular, tornando-a menos acessível às enzimas de degradação. Os mecanismos de resistência exibidos por algumas espécies de plantas a certos patógenos mediados pelo Si têm sido alvo de vários estudos (DATNOFF et al., 2007). Um das principais hipóteses diz respeito à resistência mecânica da parede celular pela maior densidade das células da epiderme, em função da deposição e polimerização do ácido monossilícico abaixo da cutícula, o silício acumulado nas lâminas foliares forma uma dupla camada de sílica-celulose, conferindo resistência a doenças fúngicas por impedir a penetração de hifas dupla camada cutícula-sílica, a chamada 'silicificação' (YOSHIDA, 1962; 1965) (Figura 3).



**Figura 3.** (a) Corte transversal do limbo foliar de monocotiledônea; (b) desenvolvimento de hifa de fungo em tecido foliar sem acúmulo de sílica e (c) camada de sílica abaixo da cutícula dificultando o desenvolvimento da hifa do fungo. Fonte: Bidwell, 1974.

## O silício na indução de resistência contra o ataque de pragas

A proteção conferida às plantas pelo Si estaria relacionada ao seu acúmulo e polimerização nas células, formando uma barreira mecânica que torna difícil o ataque de insetos-praga. Por ser uma cultura acumuladora de silício (Si), a cana-de-açúcar vem apresentando resultados muito interessantes com relação ao controle de algumas pragas (brocas e cigarrinhas seria interessante citar alguns dos principais nomes científicos dessas pragas) e também quanto à tolerância ao estresse hídrico e/ou salino. Assim, o uso de silicato, além de contribuir para o fornecimento de nutrientes (Ca, Mg e Si) e na correção da acidez do solo, pode se constituir em parte importante do manejo integrado de pragas, especialmente por intermédio da indução de resistência às plantas.

O efeito mais notório da deposição de Si na epiderme das plantas é o endurecimento desse tecido, o que representa uma barreira mecânica para os insetos que necessitam se alimentar dele, e esta é a primeira barreira que o inseto tem que atravessar para poder penetrar na planta. Assim, a rigidez e o espessamento da parede celular provocados pela deposição de sílica e/ou lignina na epiderme atuam como fatores de resistência mecânica (EPSTEIN, 1999). No caso dos insetos mastigadores, os efeitos são bastante nítidos, pois este endurecimento provoca o desgaste das mandíbulas, impedindo ou dificultando a mastigação e a ingestão dos tecidos da planta.

A maioria dos efeitos do Si sobre os insetos-praga relatados na literatura sugerem efeitos típicos de antibiose, como a redução na sobrevivência e no tamanho dos insetos e, em alguns casos, desgaste mandibular, indicando baixa eficiência alimentar. Além disso, o Si também pode provocar efeitos antixenóticos nas plantas, alterando o comportamento normal dos insetos na seleção de seu hospedeiro.

A defesa das plantas mediada pelo silício (Si) ocasiona um profundo impacto no comportamento alimentar, no desempenho e na dinâmica populacional dos insetos herbívoros. A ação do Si sobre estes insetos pode ser considerada de duas formas: 1) ação direta, no desgaste da mandíbula dos insetos mastigadores e 2) ação indireta, por meio da atração de inimigos naturais das pragas. Enquanto os efeitos diretos podem incluir reduções no crescimento e na reprodução do inseto, comumente associados à redução dos danos para a cultura, os efeitos indiretos estão normalmente relacionados com a diminuição ou o atraso na

penetração do inseto na planta (KVENDARAS; KEEPING, 2007; KEEPING et al., 2009; REYNOLDS et al., 2009).

Keeping e Kvedaras (2008) afirmam que são crescentes as evidências de um papel ativo do Si solúvel sobre o mecanismo pelo qual as plantas se defendem do ataque de insetos herbívoros, e que esse mecanismo da resistência inclui defesas mecânicas ou químicas constitutivas e induzidas, ou a combinação das duas. O mecanismo de defesa induzida das plantas envolve a produção de lignina, proteínas relacionadas à defesa, enzimas hidrofílicas, espessamento das paredes celulares e a produção de fitoalexinas.

Recentemente, estudo realizado por Reynolds et al. (2009) mostrou que o Si pode melhorar a defesa da planta hospedeira por intermédio de um terceiro nível trófico, intensificando a atração de inimigos naturais, com o consequente controle biológico pela indução de resistência da planta, provavelmente, por diferentes voláteis e/ou pela quantidade de voláteis produzidos pela planta atacada por insetos.

## **O silício na redução do estresse salino e hídrico**

O Si está envolvido em atividades metabólicas das plantas sob estresse salino, promovendo a resistência das mesmas através da garantia da integridade e estabilidade da membrana celular, devido a capacidade deste nutriente benéfico em estimular o sistema antioxidante da planta (ZUCCARINI, 2008).

Em ambientes com deficiência hídrica, a acumulação de Si nos órgãos de transpiração provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular, a qual, pelo aumento da espessura, promove uma redução da transpiração, diminuindo a abertura dos estômatos e limitando a perda de água das plantas (FARIA, 2000).

## **Silicatos na redução da toxicidade por alumínio ( $Al^{3+}$ )**

A toxicidade por  $Al^{3+}$  em plantas é um problema que atinge vastas regiões com solos ácidos em todo o mundo. O ácido silícico ( $H_4SiO_4$ ) ajuda a proteger as plantas dos efeitos tóxicos deste elemento pela formação de hidroxialuminossilicatos (HAS) inertes na solução do solo (EXLEY, 1998). Segundo Hodson & Sangster (1999), em pH próximo da neutralidade, o  $Al^{3+}$  e o Si podem formar HAS, os quais podem reduzir a toxicidade do alumínio em solução, conforme a equação:



Cocker et al. (1998) propuseram um modelo para explicar a amenização da fitotoxicidade por  $\text{Al}^{3+}$ , mediada pelo Si por meio da formação de aluminossilicatos (AS) e hidroxialuminossilicatos (HAS) no apoplasto. A formação de AS e HAS ocorreria tanto pela ação direta entre Si e Al com a parede celular das células apicais, como pela exsudação de ácidos orgânicos ou  $\text{H}^+$  pelas células, induzida pelo Si.

Em plantas superiores, o silício pode diminuir o efeito deletério de estresses abióticos causados por metais pesados ou tóxicos. O efeito do Si na diminuição da toxidez de elementos potencialmente tóxicos, como o Al, pode ocorrer dentro da planta por estímulo do sistema de antioxidantes, complexação de íons metálicos, imobilização de metais pesados durante o crescimento vegetal ou sua compartimentação em vacúolos, citoplasma (NEUMAM; NIEDEN, 2001) ou na parede celular (LIANG et al., 2007).

Sabe-se que o Si atua, tanto no solo quanto no interior das plantas, na redução da biodisponibilidade de metais pesados potencialmente tóxicos. Na planta, o efeito amenizante do Si pode ser atribuído à: 1) retenção de metais nas raízes e inibição da translocação para a parte aérea (SHI et al., 2005); 2) deposição de  $\text{SiO}_2$  no apoplasma da raiz e na superfície foliar, constituindo-se numa barreira ao fluxo apoplástico de íons metálicos e ao fluxo transpiracional, respectivamente (LUX et al., 2002); 3) co-precipitação de complexos Si-metal na parede celular e compartimentalização de metais ligados à ácidos orgânicos nos vacúolos (NEUMMAN; NIEDEN, 2001); 4) formação de complexos Si-polifenóis nos tecidos (MAKSIMOVIC et al., 2007) e 5) redução da peroxidação de lipídeos da membrana plasmática (SHI et al., 2005).

No caso específico da toxicidade por manganês (Mn), responsável por manchas pardas e necróticas nas folhas, a adição de silício pode suprimir o aumento dos compostos fenólicos causado pelo excesso deste elemento, diminuindo ou mesmo impedindo o aparecimento dos sintomas de toxidez (ROGALLA; ROMHELD, 2002).

## O uso de silicatos na cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar responde favoravelmente à adubação com Si, particularmente nos solos pobres neste elemento. Experimentos de campo conduzidos no Brasil, principalmente em solos arenosos, têm demonstrado resultados bastante consistentes com relação ao efeito do Si (silicatos de Ca e Mg), com aumentos de produção de 11 a 16% na cana planta e de 11 a 20% na cana soca (DATNOFF et al., 2001).

O cultivo da cana-de-açúcar apresenta um enorme potencial de remoção de Si. Para uma produção de 100 t ha<sup>-1</sup> são removidos cerca de 300 kg ha<sup>-1</sup> de Si, podendo chegar a 500 kg ha<sup>-1</sup> em situações de altas produtividades. Ross & Nababsing (1974) citam uma exportação de 408 kg ha<sup>-1</sup> de Si para uma produtividade de 74 t ha<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar (folhas + colmos). Essa remoção pode ser ainda maior em áreas intensivamente cultivadas e com maior produtividade.

### Efeitos dos silicatos na correção do solo e no aumento da produtividade

Prado e Fernandes (2001a) mostraram a similaridade da escória de siderurgia em relação ao calcário, incorporados de 0-20 cm em pré-plantio da cana-de-açúcar, na correção da acidez e na elevação da saturação por bases do solo, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade. Estes autores verificaram que a escória apresentou reação mais lenta no solo ao longo de sucessivos ciclos de cultivo. Esta reação mais lenta da escória em relação ao calcário, imediatamente após a sua incorporação, pode ser influenciada por fatores como: presença de Al<sup>3+</sup>, que reduz sua solubilidade e/ou de compostos de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> ligados a aluminossilicatos (ANDO et al., 1988).

Brassioli et al. (2010) verificaram que a escória de siderurgia e o calcário calcítico foram semelhantes na correção da acidez do solo, ao longo de sucessivos ciclos de cultivo da cana-de-açúcar, sendo que a maior produção de colmos esteve associada à saturação por bases do solo de 60 e 70% para o calcário e a escória, respectivamente.

Diversos trabalhos efetuados no Brasil e no exterior têm constatado os efeitos benéficos do Si em áreas de cultivo da cana-de-açúcar. Nessas áreas que

receberam a aplicação de silicato na forma de corretivo de acidez, constatou-se diminuição do tombamento das plantas, menor arranque de touceiras na colheita mecanizada e prolongamento da vida útil do canavial. Prado et al. (2003) relataram que a aplicação de escória de siderurgia, proporcionou aumento linear na produção de colmos no ciclo de cana-planta, havendo incremento quadrático na altura das plantas, além de um efeito residual positivo desta escória sobre a produção da cana-soca. O acúmulo de Si em cana-de-açúcar pode resultar em aumento da produtividade, provavelmente, devido a redução da transpiração e melhoria na estrutura da planta, como mostra o trabalho de Silveira Junior et al. (2003), que compara o efeito do silicato de cálcio ao do calcário.

Na Flórida, Elawad et al. (1982) estudaram diferentes silicatos na cultura da cana-de-açúcar, sendo duas escórias de siderurgia e o cimento. Os materiais foram aplicados e incorporados em pré-plantio e, independente da fonte, incrementaram significativamente na altura e na produção de colmos no primeiro e segundo da cana.

Ayres (1966) observou 18% de aumento na produtividade e 22% de aumento na produção de açúcar com a aplicação de 6,2 t ha<sup>-1</sup> de escória de forno elétrico aplicado em um latossolo no Haváí. O mesmo autor verificou aumentos de 10 a 15% quando o silicato foi utilizado em solos com baixos teores de Si. Gurgel (1979) observou que a aplicação de 3 t ha<sup>-1</sup> de silicato de cálcio no plantio da cana-de-açúcar aumentou em 6,4 e 16% a produtividade de colmos nos primeiro e segundo cortes, respectivamente.

Prado e Fernandes (2001b) verificaram que o efeito residual da escória de siderurgia no aumento da produção da cana-de-açúcar foi mais importante nas soqueiras, quando comparada com a cana-planta. Este fato se deve pelo menor decaimento da produção ao longo dos cortes do ciclo da cultura. Esses resultados concordam com os verificados por Anderson et al. (1991) que observaram, na média dos primeiros três ciclos, reduções de 45% e 28% na produção de colmos da soqueira nas parcelas sem e com a aplicação da escória de siderurgia, respectivamente.

Demattê et al. (2011) afirmaram que a ação positiva da escória siderúrgica no aumento da produtividade da cana-de-açúcar tem sido atribuída mais ao seu efeito corretivo no solo do que propriamente à ação do Si. Desta forma, a aplicação de escória como corretivo de acidez pode ser uma alternativa viável

de complementação ao calcário, com a vantagem adicional de fornecer Si às plantas.

Prado (2000), avaliando a resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória siderúrgica como corretivo de acidez do solo, observou que o perfilhamento foi influenciado positivamente pelo uso da escória, alcançando a produtividades de 100 e 75 t ha<sup>-1</sup> superiores às obtidas com a testemunha, na cana-planta e cana-soca, respectivamente (cana-planta = 89 t ha<sup>-1</sup> e cana-soca = 58 t ha<sup>-1</sup>). Prado e Fernandes (2000), em seus estudos com aplicação de calcário e escória siderúrgica em cana-de-açúcar cultivada em vaso, verificaram que, além da correção da acidez do solo, ambos corretivos aumentaram os teores de Ca e Mg do solo de maneira semelhante.

Sousa et al. (2010) verificaram aumentos lineares nos teores de Si em solo cultivado com cana-de-açúcar, em função das doses da escória siderúrgica aplicadas. Aos 120 dias após a aplicação ocorreram aumentos de 18, 56 e 72% nos teores de Si no solo, conforme se aplicaram 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> Si, respectivamente. Aos 260 dias, a escória continuou a fornecer Si para o solo, embora em menores proporções, sendo que, os teores foram de 2, 8 e 50% superiores à testemunha, nos tratamentos que receberam 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de Si, respectivamente. A redução expressiva nos teores de Si no solo dos 120 para os 260 dias após a aplicação pode ser explicada, pelo menos em parte, pela extração do elemento pela cultura, já que houve aumento de 41% nos teores de Si acumulado na parte aérea quando foram aplicados 400 kg ha<sup>-1</sup>.

Sobral et al. (2011) constataram que a escória siderúrgica promoveu incrementos significativos nos teores de Ca, Mg, P, Si, Fe, Zn, Mn e reduziu a acidez potencial em um Argissolo Vermelho-Amarelo da Zona da Mata de Pernambuco. Além disso, estes autores verificaram que a aplicação da escória também aumentou o teor de Zn nas folhas, a altura dos colmos e a área foliar no ciclo de cana-planta.

Arruda (2009) constatou um acúmulo médio de 350 kg ha<sup>-1</sup> de Si na parte aérea da cana-de-açúcar para uma produtividade de 110 t ha<sup>-1</sup> de colmos. Este autor verificou correlações positivas entre os teores de Si no solo e na folha diagnose (folha + 1) e a produtividade de colmos em condições de campo. Nas áreas onde os teores foliares de Si foram de 22 g kg<sup>-1</sup>, a produtividade média de colmos foi de 160 t ha<sup>-1</sup>, enquanto que, nas áreas onde os teores foram de 15 g kg<sup>-1</sup>, a produtividade ficou em 128 t ha<sup>-1</sup>.

A adubação silicatada usando 924 kg ha<sup>-1</sup> de Wollastonita resultou em substanciais incrementos nos conteúdos de Si no solo de 14 para 46 mg dm<sup>-3</sup> e foliar de 0.7 a 1,93 % (RODRIGUES, 1997). Madeiros et al. (2009) também verificaram que as concentrações foliares de Si em cana-de-açúcar foram afetadas pela aplicação de escória siderúrgica no solo, havendo um efeito interativo entre variedades e níveis de adubação.

## Efeitos do Si na redução de pragas e doenças em cana-de-açúcar

Diversos estudos demonstraram que o suprimento de Si, seja via solo, foliar ou solução nutritiva, a várias espécies de plantas mono e dicotiledôneas, tem contribuído de forma significativa na redução da intensidade de inúmeras doenças de importância econômica (BÉLANGER et al., 1995; DATNOFF et al., 2007). Raid et al. (1992) verificaram decréscimos significativos nas doenças foliares como ferrugem e mancha parda em cana-de-açúcar, após a aplicação de 6,7 t ha<sup>-1</sup> de escória, atribuindo este fato, em grande parte, ao efeito do Si contido na escória.

O ataque de pragas, principalmente a broca-da-cana (*Diatraea saccharalis*), as cigarrinhas da folha (*Mahanarva posticata*) e das raízes (*Mahanarva fimbriolata*), e de doenças como a ferrugem da cana-de-açúcar (*Puccinia melanocephala*) (DEAN & TODD, 1979) e a mancha anelar (*Leptosphaeria sacchari*), poderiam ser diminuídas nas cultivares acumuladoras de Si (KORNDÖRFER et al., 2002). Rodrigues et al. (2011) afirmaram que, além contribuir para o fornecimento de nutrientes e na correção da acidez do solo, o uso de silicato pode se constituir em parte importante do manejo integrado de pragas, especialmente por intermédio da indução de resistência às plantas.

Embora o mecanismo de resistência mais aceito seja o de natureza mecânica, outra hipótese relacionada ao mecanismo de ação do Si seria a sua atuação como ativador de genes e na sinalização para a biossíntese de compostos de defesa em um processo denominado de resistência sistêmica adquirida (RSA), na qual são sintetizados compostos como fitoalexinas, fenóis e fenilpropanóides (FAWE et al., 2001).

Portanto, além de sua função mecânica no enrijecimento das paredes, o Si poderia também desencadear mecanismos naturais de defesa, através da produção de compostos fenólicos, quitinases, peroxidases e do acúmulo de

lignina (GOMES et al., 2008; CHÉRIF et al., 1994), interferindo no crescimento e desenvolvimento dos insetos-praga e/ou dos agentes fitopatogênicos. Os compostos fenólicos produzidos seriam convertidos em vários derivados, incluindo fitoalexinas (ação antimicrobiana), cumarinas (anticoagulantes orais), flavonóides e taninos condensados (deterrentes de alimentação), além da lignina (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Chérif et al. (1994) observaram que as enzimas relacionadas com a patogênese, tais como peroxidases e polifenoloxidasas, tiveram suas atividades aumentadas em planta de pepineiro recebendo Si e inoculadas com *Pythium ultimum*, ao contrário do observado em plantas que não receberam Si e foram inoculadas com este patógeno.

A presença de Si solúvel facilitaria a rápida deposição de compostos fenólicos e/ou lignina nos sítios de infecção, formando complexos e elevando sua síntese e mobilidade no apoplasto, atuando como um mecanismo de defesa da planta contra o ataque de pragas e patógenos. Rodrigues et al. (2003) apresentaram as primeiras evidências citológicas de que o aumento na resistência do arroz à brusone mediada pelo Si ocorre devido ao acúmulo de compostos fenólicos. Rodrigues et al. (2004) também afirmaram que é bem possível que o Si, por ser um semimetal, esteja amplificando o mecanismo de resistência do arroz à brusone, por atuar na rota metabólica dos fenilpropanóides, passando a exercer uma atividade antifúngica.

Korndörfer (2010) demonstrou que a aplicação de silicato ao solo interferiu no desenvolvimento da cigarrinha-das-raízes (*M. fimbriolata*), diminuindo a longevidade de machos e fêmeas em laboratório e a população de ninfas em condições de campo e melhorando a qualidade da matéria-prima. Korndörfer et al. (2011) verificaram que a aplicação de silicato de potássio em áreas cultivadas com cana-de-açúcar reduziu as chances das populações de cigarrinha (*M. fimbriolata*) atingirem o nível de dano econômico. Como a eliminação gradual da prática da queima do canavial antes da colheita contribui com o aumento das populações de cigarrinhas, o uso de silicatos pode se constituir em parte importante do manejo integrado das pragas da cana-de-açúcar.

A broca-do-colmo (*Eldana saccharina*) é uma das pragas mais destrutiva da cana-de-açúcar na África do Sul. Em experimento conduzido naquele país com seis variedades comerciais de cana-de-açúcar utilizando duas doses de

silicato de cálcio (5 e 10 t ha<sup>-1</sup>, equivalente a 396 e 790 kg ha<sup>-1</sup> de Si puro, respectivamente), que foram comparadas com as testemunhas (sem Si). A cana-de-açúcar foi artificialmente infestada com *E. saccharina* aos 9,5 meses após o plantio e, o experimento, colhido 6 meses mais tarde. Os tratamentos com Si resultaram em significativo aumento na resistência ao ataque da broca. O teor de Si nos colmos aumentou proporcionalmente às doses de silicato aplicadas, havendo concomitante redução na massa de insetos (até 20%) e na quantidade de colmos brocados (até 23,7%) (KEEPING & MEYER, 2002).

Keeping et al. (2009) verificaram que a broca-do-colmo (*E. saccharina*) tem preferência por penetrar pelas escamas dos brotos da cana-de-açúcar, local do colmo onde o Si se acumula em menor proporção em relação ao entrenó e à zona radicular.

O acúmulo de Si nas folhas de cana-de-açúcar pelo uso de silicato resultou no controle parcial da broca-do-colmo (CAMARGO et al., 2010; KORNDÖRFER et al., 2004a). Elawad et al. (1985) observaram que as plantas de cana-de-açúcar, cultivadas dentro da casa-de-vegetação, e tratadas com 138g de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (40L de solo), reduziram de 73 para 7% o número de plantas atacadas pela broca-da-cana (*D. saccharalis*).

## **O Si na redução do estresse salino e hídrico em cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar cultivada sob irrigação, em regiões áridas e semiáridas, está frequentemente sujeita à salinidade. Ashraf et al. (2009) observaram que a combinação entre K e Si promoveu benefícios na melhoria da qualidade do caldo em genótipos de cana-de-açúcar sensíveis à salinidade. O Si depositado nas paredes celulares de raízes, folhas e colmos como sílica gel, reduziu a absorção e o transporte de sódio, neutralizando os efeitos deletérios da salinidade sobre o crescimento da planta, com melhoria na qualidade do caldo.

Mesmo apresentando grande tolerância ao estresse hídrico, a cultura da cana-de-açúcar, ocasionalmente, enfrenta períodos de seca severa que podem comprometer drasticamente a produtividade dos canaviais, levando a grandes variações de produtividade entre os anos agrícolas. Madeiros et al. (2009) relatam que a irrigação suplementar da cultura nos períodos de estiagem, faz-se necessária, pois as plantas sofrem grandes quedas de produtividade sob condições de estresse hídrico prolongado, no entanto, deve-se buscar formas de

melhorar o aproveitamento da água de irrigação.

Segundo Savant et al. (1999), em folhas de cana-de-açúcar ricas em Si, esse elemento preencheria os espaços interfibrilares, reduzindo o movimento de água através da parede celular, o que causaria economia de água pela redução da taxa transpiratória. Esse fato pode ser de grande importância, especialmente para gramíneas que crescem em regiões onde o período de estiagem é longo e severo (MA et al., 2001).

Alguns autores como Gao et al. (2004) e Ma (2004) constataram que a aplicação de Si aumenta a resistência à seca e a outros estresses bióticos e abióticos em culturas agrícolas, dentre elas a cana-de-açúcar. Observações feitas por Rossetto et al. (2005) sobre o comportamento de variedades de cana-de-açúcar em regiões mais secas sugeriram a hipótese de que o silício pode auxiliar na maior tolerância da planta à seca. Em análise no período seco, os autores constataram que as variedades RB85-5035 e RB83-5486, adaptadas a solos arenosos de baixa fertilidade e com baixos teores de umidade, foram as que, num grupo de seis, apresentaram maiores concentrações de silício nas folhas e, coincidentemente, as que menos sentiram os efeitos da estiagem.

## Considerações finais

É crescente o interesse dos agricultores quanto à utilização de Si na agricultura. Em razão desse interesse e do aumento na demanda por fertilizantes silicatados, várias empresas têm se estabelecido no mercado para comercialização de produtos contendo silício, tanto para aplicação via solo como foliar.

A dosagem de silicato a ser aplicada ainda não está bem definida, entretanto, tudo indica que quanto mais Si for absorvido pelas plantas, maiores serão as chances de se obter resultados positivos. Os silicatos por apresentarem comportamento semelhante aos calcários possibilitam a utilização de métodos de recomendação de calagem para definir a dose a ser aplicada no solo, não sendo constatado efeito tóxico de Si, quando utilizada essa metodologia, sendo imprescindível a análise de solo.

Mesmo que ainda não tenham sido constatados efeitos do uso da escória siderúrgica na contaminação dos solos com metais pesados, é importante

salientar a necessidade de se incrementar pesquisas sobre o impacto ambiental gerado pelo uso destes resíduos, gerando, assim, conhecimentos conclusivos no sentido de minimizar danos ambientais e encorajar e viabilizar sua utilização em escala comercial.

Com relação ao custo/benefício, deve-se considerar o custo de transporte, pois as fontes de silicato estão nos centros siderúrgicos e, em muitas regiões produtoras de cana-de-açúcar as utilizações como corretivo de acidez e fornecedora de Si pode se tornar economicamente inviável, no entanto, a alternativa pode ser a aplicação como fertilizante, ou seja, doses menores aplicadas no sulco de plantio. Por fim, deve ficar claro que, em solos arenosos e com baixo teor de Si, bem como em regiões sujeitas à deficiência hídrica, a queda de produtividade pode justificar a aplicação do elemento.

Acredita-se que, um programa de melhoramento que busque selecionar, entre outras características, variedades com altos teores de Si, possa atuar no aumento da resistência da cana-de-açúcar ao tombamento, facilitando a colheita mecanizada, bem como na redução dos efeitos da toxidez por metais pesados e do estresse hídrico e na tolerância das plantas a pragas, doenças e nematóides.

## Referências

AGRIANUAL - Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira. **Cana-de-açúcar**. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2008. p.235-265.

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos, 1992. p. 1-26. (Boletim Técnico, 6).

ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H.; MARTIN, F. G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on everglades histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 870-874, 1991.

ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Nutrição da cana de açúcar**. Piracicaba: Potafós, 1992. 40 p.

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo: ANDA, 2000. 156 p.

ANDO, J.; OWA, N.; ASANO, M. Studies on structure, solubility and agronomic response of industrial slag. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokio, v. 59, p. 27-32, 1988.

ARRUDA, D. P. **Avaliação de extratores químicos na determinação de silício disponível em solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2009. 78 f. (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

ASHRAF, M.; RAHMATULLAH; AHMAD, R.; AFZAL, M.; TAHIR, M. A.; KANWAL, S.; MAQSOOD, M. A. Potassium and silicon improve yield and juice quality in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under salt stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Cairo, v. 195, p. 284-291, 2009.

AYRES, A. S. Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low-silicon soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 101, n. 3, p. 216-227, 1966.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERIA, N. K. et al. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 325-30, 2001.

BÉLANGER, R. R.; BOWEN, P. A.; EHRET, D. L. et al. Soluble silicon: its roles in crop and disease management of greenhouse crops. **Plant Disease**, St. Paul, v. 79, p. 329-336, 1995.

BERTHELSEN, S.; NOBLE, A.; KINGSTON, G. et al. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka. **Proceedings...** Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science & Plant Nutrition, 2002. 57 p.

BIDWELL, R. G. S. **Plant Physiology**. New York: MaccMillan, 1974. 643 p. (The Maccmillan Biology Series).

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E. et al. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 937-944, 2010.

CHÉRIF, M.; ASSELIM, A.; BÉLANGER, R. R. Defense responses induced by soluble silicon in cucumber roots infected by *Pythium* spp. **Phytopathology**, St. Paul, v. 84, p. 236-242, 1994.

COCKER, K. M.; EVANS, D. E.; HODSON, M.J. The amelioration of aluminum toxicity by silicon in higher plants: solution chemistry or an in plants mechanisms? **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 104, p. 608-614, 1998.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar**, terceiro levantamento, abril/2011. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2011. 19 p.

DATNOFF, L. E.; RODRIGUES, F. A.; SEEBOLD, K. W. Silicon and plant disease. In: DATNOFF, L. E.; ELMER, W. H.; HUBER, D. M. **Mineral nutrition and plant disease**. St. Paul: The American Phytopathological Society Press, 2007. p. 233-246.

DATNOFF, L. E., SNYDER, G. H., KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.

DAYANANDAM, P., KAUFMAN, P. B., FRAKIN, C. I. Detection of silica in plants. **American Journal of Botany**, Bronx, v. 70, p. 1079-1084, 1983.

DEFELIPO, D. V.; NOGUEIRA, A. V., LOURES, E. G. et al. Eficiência agrônômica de um resíduo de indústria siderúrgica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 127-131, 1992.

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane genotypes grown on Everglades Histosols. **Journal of Plant Nutrition**, Monticello, NY, v. 16, n. 11, p. 2273-2280, 1993.

DIAS, F. L. F. Relação entre a produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-açúcar, na Região Noroeste do Estado de São Paulo. 1997, 64 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

ELAWAD, S. H.; GASCHO, G. J.; STREET, J. J. Response of sugarcane to silicate source and rate. II. Leaf freckling and nutrient content. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 484- 87, 1982.

ELAWAD, S. H.; ALLEN JR., L. H.; GASCHO, G. J. Influence of UV-B radiation and soluble silicates on the growth and nutrient concentration of sugarcane. **Soil and Crop Science Society of Florida**, Belle Glade, v. 44, p. 134-141, 1985.

EPSTEIN, E. Photosynthesis, inorganic plant nutrition, solutions, and problems. **Photosynthesis Research**, Hague, v. 46, p. 37-39, 1995.

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

FARIA, R. Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo. 2000. 125 f. **Dissertação** (Mestrado) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Lavras. Viçosa, 2000.

FAWE, A.; MENZIES, J. G.; CHÉRIF, M.; BÉLANGER, R. R. Silicon and disease resistance in dicotyledons. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. New York: Elsevier Science, 2001. p. 159-169.

FOY, C. D. Soil chemical factors limiting plant root growth. **Advances in Soil Science**, New York, v. 19, p. 97-149, 1992.

GAO, X. P., ZOU, C. Q.; WANG, L. J. et al. Silicon improves water use efficiency in maize plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.27, n.8, p.1457-1470, 2004.

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

GURGEL, M. N. A. Efeitos do silicato de cálcio e sua interação com fósforo no estado nutricional, produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. 1979, 62 f. **Dissertação** (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1979.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Aluminium/silicon interactions in conifers. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 76, p. 89-98, 1999.

KATO, N.; OWA, N. Dissolution of slag fertilizers in a paddy soil and Si uptake by rice plant. **Soil Science Plant Nutrition**, Tokio, v. 43, n. 2, p. 329-341, 1997.

KEEPING, M. G.; KVEDARAS, O. L.; BRUTON, A. G. Epidermal silicon in sugarcane: Cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina*. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 66, p. 54-60, 2009.

KEEPING, M. G.; KVEDARAS, O. L. Silicon as a plant defence against insect herbivory: response to Massey, Ennos and Hartley. *Journal of Animal Ecology*, Oxford, v. 77, p. 631-633, 2008.

KEEPING, M. G.; J. H. MEYER. Calcium silicate enhances resistance of sugarcane to the African stalk borer *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Agricultural and Forest Entomology*, Malden, v. 4, p. 265-274, 2002.

KIM, S. G.; KIM, K. W.; PARK, E. W. et al. Silicon-induced cell wall fortification of rice leaves: A possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast. *Phytopathology*, St. Paul, v. 92, p. 1095-1103, 2002.

KORNDÖRFER, A. P.; GRISOTO, E.; VENDRAMIM, J. D. Induction of insect plant resistance to the spittlebug *Mahanarva fimbriolata* Stål (Hemiptera: Cercopidae) in sugarcane by silicon application. *Neotropical Entomology*, v. 40, n. 3, p. 387-392, 2011.

KORNDÖRFER, G. H.; OLIVEIRA, L. A. Uso de silício em culturas comerciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 5., 2010, Viçosa. Anais..., Viçosa, MG: UFV, DFP, 2010. p. 3-25.

KORNDÖRFER, A. P. Efeito do silício na indução de resistência à cigarrinhas-das-raízes *Mahanarva fimbriolata* Stål (Hemiptera: Cercopidae) em cultivares de cana-de-açúcar. 2010. 101 f. Tese (Doutorado em Entomologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2010.

KORNDÖRFER, G. H. Uso do silício na agricultura. *Informações Agrônômicas*, Piracicaba, n. 117, p. 9-11, 2007.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. 3 ed. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004a. 24 p. (Boletim Técnico, 1).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004b. 34 p. (Boletim Técnico, 2).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 21, n. 1, p. 6-9, 2002.

KORNDÖRFER, G. H.; COLOMBO, C. A.; LEONE, L. L. Termofosfato como fonte de silício para a cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 19, n. 1, p. 34-36, 2000.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, n. 1, p. 101-106, 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 70, p. 1-3, 1995.

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

LIMA FILHO, O. F. **Uso de escória de siderurgia na agricultura**. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?secao=Artigos%20Especiais&id=24353>> Acesso em: 24/10/2011.

LIMA FILHO, O. F. **História e uso do silicato de sódio na agricultura**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2009. 112 p.

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

LUX, A.; LUXOVA, M.; HATTORI, T. et al. Silicification in sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars with different drought tolerance. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 115, p. 87-92, 2002.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**, Basel, v. 65, p. 3049-3057, 2008.

MA, J. F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokio, v. 50, p. 11-18, 2004.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan**. New York: Elsevier Science, 2002. 274 p.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plant. In: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. **Silicon in Agriculture**. New York: Elsevier Science. 2001. p. 17-39.

MADEIROS, L. B.; VIEIRA, A. O.; AQUINO, B. F. Micronutrientes e silício nas folhas da cana-de-açúcar: escória siderúrgica aplicado no solo. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, p. 27-37, 2009.

MAKSIMOVIC, J. D.; BOGDANOVIC, J.; MAKSIMOVIC, V. et al. 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**, Wiley, v. 170, p. 739-744, 2007.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações: adubos minerais e orgânicos, interpretação da análise do solo, prática da adubação**. São Paulo: Nobel, 2002. 220 p.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados: mitos, mistificações e fatos**. Piracicaba: ProduQuímica, 1994. 153 p.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao>> Acesso: 26/10/2011.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition in higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MATICHENKOV, V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. **Journal of the American Society of Sugarcane Technologists**, Baton Rouge, v. 22, p. 21-30, 2002.

MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CRUSCIOL, C. A. C. et al. Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adução silicatada e nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 27, p. 867-873, 2003.

MITANI, N.; MA, J. F. Uptake system of silicon in different plant species. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 56, p. 1255-1261, 2005.

NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA, K. P. V.; RODRIGUES, F. A. Silício e tolerância de plantas a metais pesados. In: RIBEIRO, M. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO FILHO, M. R. et al. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 273-318.

NEUMAM, D.; NIEDEN, U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. **Phytochemistry**, New York, v. 56, p. 685-692, 2001.

ORLANDO FILHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. **Seja o doutor do seu canavial**. Encarte de Informações Agronômicas, n. 76, set. 1994, 6p.

PRADO, F. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 287-296, 2003.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo, e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 129-135, 2002.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Resposta da cultura da cana-de-açúcar à aplicação de escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 201-209, 2001a.

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

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudos na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 67 p.

PRADO, R. M. Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez do solo. 2000. 79 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) -Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Eficiência da escória de siderurgia em areia quartzosa na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. **STAB**, Piracicaba, v. 18, p. 36-39, 2000.

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.

RAID, R. N.; ANDERSON, D. L.; ULLOA, M. F. Influence of cultivar and amendment of soil with calcium silicate slag on foliar disease development and yield of sugar cane. **Crop Protection**, Surrey, v. 11, p. 84-88, 1992.

RAIJ, B. Van **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute (IPNI), 2011. 420 p.

RAIJ, B. Van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2. ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

REIS, T. H. P. GUIMARÃES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C. et al. **O silício na nutrição e defesa de plantas**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007, 120 p. (Boletim Técnico, 82).

REYNOLDS, O. L.; KEEPING, M. G.; MEYER, J. H. Silicon-augmented resistance of plants to herbivorous insects: a review. **Annals of Applied Biology**, Cambridge, v. 155, p. 171-186, 2009.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, A. P. et al. Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 134, p. 14-20, 2011.

RODRIGUES, F. A.; McNALLY, D. J.; DATNOFF, L. E. et al. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. **Phytopathology**, St. Paul, v. 94, p. 177-183, 2004.

RODRIGUES, F. A.; BENHAMOU, N.; DATNOFF, L. E. et al. Ultrastructural and cytochemical aspects of silicon-mediated rice blast resistance. **Phytopathology**, St. Paul, v. 93, p. 535-546, 2003.

RODRIGUES, G. P. Efeito do silicato de cálcio na cana-de-açúcar e sobre as características químicas do solo. 1997. **Monografia** (Curso de Graduação em Agronomia). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 1997.

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

ROSS, L.; NABABSING, P.; CHEONG, W. Y. Y. Residual effect of calcium silicate applied to sugarcane soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE SOCIETY SUGAR CANE TECHNOLOGY, 15., Durban. **Proceedings...**, v. 15 n. 2 p. 539-542, 1974.

ROSSETTO, R.; LIMA FILHO, O. F.; AMORIM, H.V. et al. Silicon content in different sugarcane varieties. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. **Proceedings...**, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005. p. 134.

SAVANT, N. K.; KORNDORFER, G. H.; DATNOFF, L. E. et al. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 22, n. 12, p. 1853-1903, 1999.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E. et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.

SENA, M. C.; CASTRO, S. H. Legislação e fiscalização do uso de silício na agricultura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 5., 2010, Viçosa. **Anais...**, Viçosa, MG: UFV, DFP, 2010. p. 183-202.

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

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

SOUSA, R. T. X.; KORNDÖRFER, G. H.; WANGEN, D. R. B. Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, p. 669-676, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R. et al. **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. p. 420-433.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. J.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers**. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. 634 p.

WALLACE, A. Relationships among nitrogen, silicon and heavy metal uptake by plants. **Soil Science**, Baltimore, v. 147, p. 457-60, 1989.

YOSHIDA, S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute of Agricultural Science**, Tokio, v. 15, p. 1-58, 1965.

YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Chemical forms mobility and deposition of silicon in rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokio, v. 8, p. 15-21, 1962.

**Embrapa**

---

*Tabuleiros Costeiros*

Ministério da  
**Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**

G O V E R N O F E D E R A L  
**BRASIL**  
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA