

IMPORTÂNCIA DO SILÍCIO PARA A CULTURA DO ARROZ

(uma revisão de literatura)

M.P. Barbosa Filho¹, G.H. Snyder², A.S. Prabhu¹, L.E. Datnoff¹, G.H. Korndörfer³

INTRODUÇÃO

O silício solúvel, tanto em solos como em fertilizantes, não tem sido estudado no Brasil tão intensivamente como outros nutrientes, principalmente por não ser considerado um elemento essencial às plantas. Entretanto, numerosos autores no Japão, Coréia, Taiwan e no Sul da Flórida, nos Estados Unidos, têm demonstrado a importância do Si para as culturas do arroz e da cana-de-açúcar (IMAIZUMI & YOSHIDA, 1958; PARK et al., 1964, 1976; TAKIJIMA et al., 1970; LIAN, 1976; YOSHIDA et al., 1976, 1979; SNYDER et al., 1986; DATNOFF et al., 1991, 1992; DEREN et al., 1992, 1994; MATICHENKOV et al., 1995).

Mesmo não sendo essencial, do ponto de vista fisiológico, para o crescimento e o desenvolvimento das plantas (EPSTEIN, 1994), a sua absorção traz inúmeros benefícios, principalmente ao arroz. Isto mostra a "essencialidade agrônômica" deste elemento para um aumento e/ou produção sustentável desta cultura.

Em geral, os produtos usados nequeles países como fonte de Si para o arroz são basicamente resíduos obtidos das usinas de aço, no Japão, e da fabricação de fosfato tricálcico, nos Estados Unidos, denominados genericamente de "slags" ou silicatos de cálcio. Entretanto, há uma grande variação na composição e disponibilidade de Si desses "slags" para a cultura do arroz, dependendo, sobretudo, do processo industrial utilizado na fabricação do aço ou do fosfato. A disponibilidade de Si nestes materiais pode variar, também, dependendo da relação Ca:Si e do tamanho de grânulos.

No Japão, 25% da área cultivada com arroz recebe, anualmente, aplicações de silicatos de cálcio, que pode variar de 0,5 a 1,0 t, embora a quantidade recomendada seja de 1,5 a 2,0 t/ha.

Além do efeito do Si como elemento útil para o arroz, capaz de aumentar o rendimento da cultura, vários pesquisadores

.....
Pesquisas recentes, realizadas em solos orgânicos no Sul da Flórida, demonstraram que a fertilização com Si reduziu a incidência de brusone de 17% a 31% e a mancha parda de 15% a 32% em relação ao tratamento que não recebeu silício
.....

demonstraram que ele está relacionado à reação do arroz a várias e importantes doenças. Pesquisas mais recentes, realizadas em solos orgânicos no Sul da Flórida, demonstraram que a fertilização com Si reduziu a incidência de brusone de 17% a 31% e a mancha parda de 15% a 32% em relação ao tratamento que não recebeu silício (DATNOFF et al., 1990, 1991).

No Brasil, a cultura do arroz pode também responder à adubação com Si dependendo da sua disponibilidade no solo. Entretanto, para conhecer a necessidade de

uma prática como esta, é preciso, inicialmente, desenvolver métodos eficientes de análise de Si no solo, na planta e nos fertilizantes. Somente a partir do conhecimento das técnicas de extração de Si e das relações entre o Si no solo e na planta pode-se estabelecer um critério para aplicação de fertilizante silicatado.

Entre os métodos estudados para avaliar o Si solúvel no solo incluem-se os extratores ácidos, como ácido cítrico, acético e acetato de amônio tamponado a pH 4,0. O Si extraído por estes métodos, entretanto, nem sempre correlaciona-se com o Si absorvido pelas plantas e, geralmente, subestima a necessidade de fertilização. Reconhecendo este problema, NONAKA & TAKAHASHI (1988, 1990) desenvolveram um método baseado no silicato solúvel em água dos solos submersos através da incubação do solo. Com este método, o Si extraído do solo geralmente correlaciona-se melhor com o Si absorvido pela planta de arroz. O mesmo acontece quando se avalia o Si disponível para as plantas em fertilizantes silicatados (slags). Para as condições brasileiras, estas informações não são encontradas na literatura, havendo necessidade, portanto, de investigações mais detalhadas.

Espera-se, então, que, a partir dessas informações básicas, e uma vez demonstrada a eficiência do Si em reduzir a incidência de doenças do arroz, a fertilização com Si em combinação com doses reduzidas de fungicidas possa constituir-se numa alternativa mais sustentável do manejo de doenças no ecossistema de cerrado.

A IMPORTÂNCIA DO SILÍCIO COM RELAÇÃO ÀS DOENÇAS DO ARROZ

O silício, embora não faça parte da lista dos elementos essenciais, é considerado elemento útil para o crescimento e produ-

¹ Pesquisador, EMBRAPA Arroz e Feijão, Caixa Postal 179, CEP 75375-000, Santo Antônio de Goiás-GO. E-mail: morel@cnpaf.embrapa.br

² Professor, University of Florida, Everglades Research & Education Center, Belle Glade, FL. E-mail: ghs@gnv.ifas.ufl.edu

³ Professor Titular, Universidade Federal de Uberlândia, Caixa Postal 593, CEP 38400-902, Uberlândia-MG. E-mail: gaspaeh@triang.com.br

ção de muitas gramíneas (arroz, cana-de-açúcar, sorgo, milheto, trigo, milho, capim kikuyo, capim guiné, entre outras). Solos extremamente intemperizados, ácidos, com alto potencial de lixiviação, baixa saturação de bases e de Si trocável e baixa relação sílica/sesquióxidos de Fe e Al, são predominantes em várias regiões da América Latina, África, Ásia e Austrália. Solos tropicais com estas propriedades são classificados como Oxissolos e Ultissolos e, como tal, apresentam baixa capacidade de fornecimento de silício disponível (BRADY, 1992).

Nos últimos cinco anos, o Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), o Instituto Colombiano de Agricultura (ICA) e a Embrapa Arroz e Feijão, desenvolveram cultivares de arroz para estas condições de solo. Com isto, vastas áreas tradicionalmente utilizadas para pecuária extensiva estão sendo utilizadas para a produção de grãos, e o arroz de terras altas tem sido a principal cultura na exploração sustentável dessas áreas, seja em sistema solteiro ou em associação com pastagens.

Atualmente, no Brasil, são cultivados mais de 5 milhões de hectares de arroz, com rendimento abaixo de 3,0 t/ha. Entre os fatores responsáveis por esta baixa produtividade destacam-se a baixa fertilidade do solo, a alta suscetibilidade do arroz à brusone (*Pyricularia grisea*) e à mancha nos grãos (*Drechslera oryzae*, *Phoma sorghina*, *Alternaria padwickii*). O silício tem sido demonstrado como elemento útil para o arroz, capaz de aumentar o rendimento desta cultura através da diminuição da toxidez de Fe e Mn e do aumento da disponibilidade de P, devido a sua liberação dos fosfatos de Fe (OKUDA & TAKAHASHI, 1965; JONES & HANDRECK, 1967; LIAN, 1976; MA & TAKAHASHI, 1990a, 1990b, 1991). Além desse efeito do Si no solo, vários pesquisadores demonstraram que ele também está relacionado com a reação do arroz a várias e importantes doenças, tais como a brusone, causada por *Pyricularia grisea*, escaldadura, causada por *Microdochium oryzae*, mancha parda, causada por *Drechslera oryzae* (OHATA et al., 1972; ELAWAD & GREEN Jr., 1979; KIM & LEE, 1982; ALESHIN et al., 1987; DATNOFF et al., 1990, 1991). A incidência de doenças é menor quando o teor de Si no tecido da planta é maior (DATNOFF et al., 1990, 1991; OSUNA-CANIZALES et al., 1991; KORN-DÖRFER et al., 1999a). O Si é absorvido pelas plantas como ácido monossilícico - $\text{Si}(\text{OH})_4$ (JONES & HANDRECK, 1967), e acredita-se que o mecanismo de resistência da planta esteja associado com o teor de Si no tecido da parede celular, tornando-a mais resistente à degradação enzimática. Segundo BALASTRA et al. (1989), o silício é transportado pelo xilema e as maiores quantidades são depositadas na parede celular destes vasos. A forma de deposição de silício é como sílica amorfa e hidratada ou opala ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Uma vez depositado, o silício torna-se imóvel e não mais se redistribui nas plantas. SNYDER et al. (1986) sugerem que as plantas de arroz deveriam conter pelo menos 3% de Si na parte aérea para garantir um ótimo desenvolvimento.

Solos ácidos, orgânicos e tropicais, tais como Oxissolos, constituem uma condição particular para conduzir estudos básicos sobre nutrição de Si e, principalmente, sobre o desenvolvimento de doenças em condições de baixa disponibilidade de silício. Uma vez demonstrada sua eficiência em reduzir a incidência de importantes doenças do arroz, a fertilização com Si poderá cons-

tituir, isoladamente, ou em combinação com fungicidas, uma alternativa de manejo de doenças no ecossistema de cerrado. As informações quanto à relação entre o conteúdo de silício na casca dos grãos e a severidade de manchas nos grãos são limitadas e necessitam de estudos detalhados para identificar cultivares com alto e baixo conteúdo de sílica.

Na Colômbia, a aplicação de silicato, em um solo altamente intemperizado, reduziu a severidade da escaldadura das folhas e da brusone de 26% e 53%, respectivamente, nas parcelas que não receberam silicato, para 15% quando o silicato foi aplicado (CORREA-VICTORIA et al., 1996).

O Si absorvido pela planta é depositado principalmente na parede celular, abaixo da cutícula, aumentando a rigidez da célula (ADATIA & BESFORD, 1986), e podendo elevar os conteúdos de hemicelulose e lignina da parede celular (LEE et al., 1990). O mecanismo de resistência a doenças é atribuído à associação do Si com constituintes da parede celular, tornando-as menos acessíveis às enzimas de degradação. Apesar disso, existem pesquisadores que acreditam que o Si, além do efeito puramente mecânico, também teria um papel de proteção sistêmica contra fungos.

O manejo das doenças tem sido feito através da utilização de cultivares resistentes ou de fungicidas. Embora estes métodos diminuam a incidência das doenças, a complexidade de raças dos patógenos causa quebra de resistência nos primeiros anos do lançamento das cultivares. Além do fungicida ser considerado insumo de alta tecnologia, que nem sempre é adequado aos pequenos produtores, é também considerado uma ameaça ao ambiente. Em consequência, outras estratégias de controle de doenças mais sustentáveis são necessárias. O emprego da nutrição mineral como forma de aumentar a resistência das plantas às doenças é uma alternativa sustentável, pois contribui para a conservação dos solos de cerrado e para a preservação da saúde humana através do menor uso de fungicidas. A fertilização com sílica pode ser uma alternativa, como demonstram os resultados das pesquisas realizadas por KIM & LEE (1982); DATNOFF et al. (1990, 1992); LIN et al. (1990); MENZIES et al. (1991); OSUNA-CANIZALES et al. (1991) e CORREA-VICTORIA et al. (1996).

A IMPORTÂNCIA DO SILÍCIO EM RELAÇÃO ÀS PRAGAS

O silício tem demonstrado efeito no controle de algumas pragas do arroz. O comportamento dos insetos é afetado pela presença de altos níveis de Si na planta (SAVANT et al., 1997). Os insetos afetados por alto conteúdo de silício na planta são: *Chilo suppressalis*, *Scirpophaga incertulas* (YOSHIDA, 1975; SAVANT et al., 1994), *Chlorops oryzae*, *Niphotettix bipunctatus cincticeps* (MAXWELL et al., 1972), *Nilaparvata lugens* (SUJATHA et al., 1987), *Sogetella furcifera* (SALIM & SAXENA, 1992) além dos ácaros (TANAKA & PARK, 1966). A infestação de broca do colo (*Elasmopalpus lignosellus*) foi reduzida consideravelmente com a adição de Si mas não houve diferença em infestação nos solos não deficientes (NAKANO et al., 1961). Nos viveiros de mudas de arroz fertilizadas com Si em forma de cinza de casca de arroz houve redução do número de plantas com coração morto por broca de colo na cultivar Jaya, após o transplântio (SAVANT et al.,

1994). Alguns genótipos são mais eficientes do que outros no acúmulo de Si o que, possivelmente, contribui para resistência às doenças e insetos (WINSLOW, 1992, DEREN et al., 1994), embora nem sempre os genótipos com alto conteúdo de Si apresentem resistência. Os fatores físicos e bioquímicos, além da genética, que influenciam a resistência a insetos, devem ser identificados (SAVANT et al., 1997).

A silicificação da epiderme previne a penetração e a mastigação pelos insetos porque as células ficam mais endurecidas (YOSHIDA, 1975). Larvas da broca de colo, nutridas com plantas com alto conteúdo de silício, tiveram as mandíbulas danificadas (DJAMIN & PATHAK, 1967). A camada da epiderme das folhas de arroz selvagem (*O. brachyantha*) é mais densa do que a da cultivar suscetível IR 31917, o que contribuiu para a resistência física contra os danos causados pelas mandíbulas da larva do enrolador da folha (*Cnaphalocrocis medinalis*) (IRRI, 1991). A presença de células silicatadas nas folhas inibiu a raspagem pelas larvas de enrolador da folha no tecido das plantas tratadas com Si, resultando em maior redução de peso dos insetos que nas plantas não tratadas (IRRI, 1991). Foi demonstrada uma correlação positiva entre o conteúdo de silício no tecido da planta de arroz e a resistência a *Nilaparvata lugens* (SUJATHA et al., 1987).

As investigações sobre o efeito de silício nas cultivares IR 2035 e suscetível TN 1 constataram redução da longevidade de fêmeas e machos, assim como na fertilidade de insetos e, conseqüentemente, no aumento da população na cultivar suscetível devido ao aumento dos níveis de Si na solução nutritiva (IRRI, 1991). Em outra investigação, o ácido silícico, nas quantidades de 0,01 mg/ml na seiva, atuou como inibidor da atividade da cigarrinha parda (*Nilaparvata lugens*) (YOSHIDA et al., 1979).

O metassilicato de sódio (escória de alto forno - 20,2% SiO₂) e a casca do arroz (14,5% SiO₂), na dose de 1 t SiO₂/ha, foram empregados visando reduzir a população de *Stenchaetothrips biformis*, *Orseolia oryzae* e *Cnaphalocrocis medinalis* no campo. As duas formas de Si (fontes) reduziram a população de trips. A casca de arroz foi, no entanto, a fonte que teve melhor efeito sobre a *C. medinalis* (SUBRAMANIAN & GOPALASWAMY, 1988).

No Brasil, não há informações sobre o efeito do silício na incidência de pragas de importância econômica do arroz. Assim sendo, investigações são necessárias visando conhecer melhor os efeitos positivos encontrados em estudos realizados em outros países.

DETERMINAÇÃO DO SILÍCIO NO SOLO

A cultura do arroz pode responder à adubação com silício, dependendo da sua disponibilidade no solo. Para conhecer a necessidade de fertilização com Si e outros fatores relacionados ao "status" do silício no solo, é necessário desenvolver métodos eficientes de análise de Si no solo, na planta e nos fertilizantes.

Desde os anos 50, os pesquisadores japoneses vêm estudando as relações entre Si no solo e na planta e a fertilização do

arroz com Si. IMAIZUMI & YOSHIDA (1958) compararam a quantidade de Si absorvida pela planta de arroz com a quantidade de Si extraída dos solos pelo HCl, oxalato de amônio pH 3,0, Na₂CO₃ a 2%, água saturada com CO₂, H₂SO₄ 0,002 N e acetato de amônio pH 4,0. Os autores concluíram que o Si solúvel em ácido diluído foi o que melhor se correlacionou com a absorção de Si pelas plantas e com a capacidade de suprimento de Si pelo solo, e, ainda, que o Si solúvel em meio alcalino não refletiu a capacidade do solo em suprir Si para as plantas. Posteriormente, observaram que o Si no solo foi mais solúvel em ácido do que em soluções neutras e que a extração de Si dos solos por vários reagentes testados ocorreu na seguinte ordem: oxalato > citrato > tartarato > acetato > cloreto. Disso, concluíram que a dissolução do Si no solo aumenta devido à quelatação dos óxidos de Fe e Al, os quais funcionam como fixadores de silicatos no solo.

Reconhecendo que os compostos de Fe e Al afetam a dissolução do Si no solo, KAWAGUCHI & MATSUO (1958) e KA-

A silicificação da epiderme previne a penetração e a mastigação pelos insetos porque as células ficam mais endurecidas. Larvas da broca de colo, nutridas com plantas com alto conteúdo de silício, tiveram as mandíbulas danificadas. A camada da epiderme das folhas de arroz selvagem (*O. brachyantha*) é mais densa do que a da cultivar suscetível IR 31917, o que contribuiu para a resistência física contra os danos causados pelas mandíbulas da larva do enrolador da folha

(*Cnaphalocrocis medinalis*)

WAGUCHI et al. (1958) estudaram as relações de Si/Fe e Si/Al e as quantidades de Si extraídas pelo acetato de amônio pH 4,0 e HCl 0,5 N para avaliar a capacidade de suprimento de Si pelo solo. KHALID et al. (1978) usaram o Si extraível em H₂O e o Si extraível em ácido acético (pH 3,5), contendo 50 mg P/litro como Ca(H₂PO₄), para estudar o silício residual no solo após a aplicação de silicato de cálcio (slag). A idéia era que o Si extraível em água representava a concentração na solução do solo em equilíbrio com o sistema solo (fator intensidade), enquanto o Si extraível em solução de fosfato acidificado representava a quantidade de Si que permanece no solo numa forma adsorvida (fator quantidade). Assim, ambos os métodos de extração podem fornecer informações diferentes, mas úteis.

IMAIZUMI & YOSHIDA (1958) estabeleceram um critério para a aplicação de fertilizante silicatado, segundo o qual a cultura do arroz responderia à adubação com Si caso a quantidade de Si no solo extraível em acetato de sódio pH 4,0 fosse menor que 4,9 mg de Si/100 g de solo. O método do acetato tamponado tem sido usado no Japão e em Taiwan, e, com algumas modificações, na relação solo/solução, tempo e temperatura de agitação, para estimar a disponibilidade de Si nos solos para a cultura do arroz na Coreia (PARK, 1976; LIAN, 1976). Entretanto, em solos calcários da China, que continham de 7,1 a 18,1 mg Si/100 g de solo pelo método do acetato de sódio tamponado, a cultura do arroz ainda respondeu à aplicação de fertilizante silicatado (LIANG et al., 1994). Possivelmente, em solos calcários, o método do acetato tamponado superestima a quantidade de Si disponível nestas condições. Em geral, para solos tropicais (ácidos), o uso do acetato de sódio tamponado para extrair Si e determinar a necessidade de Si em arroz não tem sido intensivamente estudado.

Na Índia, NAYAR et al. (1977) compararam o método do acetato de sódio 1 N pH 4,0 com outros três extratores (água destilada, HCl 0,2 N e ácido cítrico 0,025 M) e concluíram que o poder de extração de Si dos reagentes seguia a ordem: HCl 0,2 N > ácido cítrico 0,025 M > acetato tamponado 1 N > água destilada,

com algumas exceções. Em experimento de casa de vegetação conduzido posteriormente, o Si do solo extraível em ácido cítrico mostrou melhor correlação com o Si absorvido pelas plantas de arroz. Para solos tropicais da Malásia e Tailândia, KAWAGUCHI (1966) tem usado 3,3 mg Si/100 g de solo e, para solos do Sri Lanka, TAKIJIMA et al. (1970) usaram 3,8 mg de Si/100 g de solo, extraível em acetato tamponado, como critério para prever a resposta ao Si da cultura do arroz. No Brasil, segundo KORN-DÖRFER et al. (1999b), relativamente pouca diferença existe entre os métodos de extração testados (ácido acético, água, cloreto de cálcio 0,0025 M e tamponado a pH 4,0) quanto à capacidade dos mesmos em estimar a disponibilidade do Si no solo para o arroz de sequeiro. Todos apresentaram um elevado grau de correlação com o Si acumulado na parte aérea do arroz, no entanto, foi o extrator ácido acético 0,5 M o que apresentou o maior coeficiente de determinação. Este extrator, além de ser de simples preparo, também apresenta um custo de reagente bastante baixo e isso facilita o seu uso em análises de rotina, isto é, para um grande número de amostras.

Foi observada uma relação positiva entre o teor de Si no percolado de solo irrigado e o teor de Si em plantas de arroz (IRRI, 1965). Segundo LIAN (1976), o método de percolação reflete melhor as condições reais dos solos submersos, enquanto o método do acetato tamponado estima apenas o Si disponível indiretamente em amostras de solo secas ao ar.

Um método para análise de Si no solo baseado na extração com ácido acético 0,5 M foi desenvolvido por SNYDER (1991), para determinar a necessidade de fertilização do arroz com Si em solos orgânicos da região dos Everglades, no Sul da Flórida (EUA).

Do ponto de vista de confiabilidade de um método de análise de Si em solos submersos (solos de arroz irrigado), deve-se levar em consideração dois pontos: (1) O baixo potencial redox (Eh) dos solos inundados aumenta a solubilidade do Si em água, ao passo que amostras de solo seco com alto potencial redox podem não representar verdadeiramente as condições do solo no qual as raízes do arroz absorvem o Si; (2) A maioria dos extratores geralmente subestima a necessidade da fertilização com Si de solos que receberam previamente aplicação de fertilizantes silicatados (slag). Isto ocorre porque o Si extraído com acetato tamponado evidentemente aumenta em solos tratados com "slag" (NONAKA & TAKAHASHI, 1990). Possivelmente, o acetato tamponado seja um extrator muito "forte" ou energético, que extrai Si não disponível dos "slags" previamente aplicados ao solo. Por esta razão, NONAKA & TAKAHASHI (1988, 1990) desenvolveram um método para medir o Si solúvel em água em solos inundados, através da incubação. Com este método, o Si extraído de solos que receberam previamente aplicações de silicatos geralmente correlacionava melhor com o Si na palha do arroz do que o Si extraído com o método do acetato tamponado, embora para alguns solos nenhum dos métodos têm mostrado boa correlação. Os referidos autores consideraram que o período de duas semanas entre a amostragem do solo e a obtenção dos resultados poderia ser uma desvantagem deste método de incubação.

Recentemente, SUMIDA (1992) desenvolveu um método de incubação que requer mais tempo (quatro semanas a 30°C e

relação solo/água de 1:4) do que o método de NONAKA & TAKAHASHI (1990). SUMIDA (1992) concluiu que o método de incubação por quatro semanas estima razoavelmente o Si disponível em vários solos, mas nem sempre o Si extraído por este método correlacionava bem com o Si absorvido pelo arroz. Este autor desenvolveu um outro método que media a dissolução e a adsorção do Si (fatores intensidade e capacidade) em solos submersos através da incubação dos solos com uma solução de silicato contendo de 0 a 46,6 ppm Si a 30°C, usando uma relação solo/solução de 1:10. Baseado neste método, calculou o "silicato potencialmente solúvel" através da seguinte equação: $C = (uc + av)/a$, onde $v = \text{mg de silicato dissolvido ou adsorvido/100 g de solo}$; $u = \text{mg de SiO}_2/\text{L de solução sobrenadante}$; $c = \text{concentração}$; $a = \text{constante indicando a concentração de SiO}_2$, na qual nem dissolução nem adsorção ocorrem, e $C = \text{SiO}_2$ potencialmente solúvel. O referido autor concluiu que este método fornecia índices mais adequados da capacidade de suprimento de Si dos solos inundados adubados previamente com silicatos de cálcio. Este método do silicato potencialmente solúvel pode ser eficiente, mas não é um método de rotina adequado para análise de Si devido ao longo período requerido para a incubação.

A temperatura de incubação do solo ou de agitação (extração) pode ser um fator crítico na avaliação de um método de análise de Si disponível no solo de uma dada região agro-ecológica, uma vez que a capacidade do solo em suprir Si e a adsorção pelo arroz dependem da temperatura (SUMIDA & OHYAMA, 1990).

DETERMINAÇÃO DO SILÍCIO NA PLANTA

Não há muita controvérsia sobre qual parte da planta deve ser analisada. Em geral, a parte aérea de toda a planta coletada na época da colheita é a mais indicada para análise química, porque normalmente a produção de matéria seca da parte aérea está relacionada com o rendimento de grãos. PARK et al. (1964) usou o teor de Si da folha bandeira como índice indicativo da disponibilidade de Si no solo. Segundo IMAIZUMI & YOSHIDA (1958), CHANG (1978) e IRRI (1978), para análise foliar é necessária uma amostragem composta de 10 pontos representativos por campo de arroz.

Com base em vários experimentos da resposta do arroz ao Si aplicado, conduzidos no Japão, Coreia e Taiwan, LIAN (1976) observou que o teor crítico de Si na palha do arroz foi de 6,1% no Japão e Coreia e de 5,1% em Taiwan.

Em ecossistema de regiões mais frias, as variedades japônicas parecem responder à aplicação de silicatos quando o teor de Si na palha é menor do que 5,1%. Já em regiões tropicais do Sri Lanka e da Índia, as variedades indica podem responder à aplicação de Si quando o teor de Si na palha é menor do que 3,7% (NAIR & AIYER, 1968, TAKIJIMA et al., 1970). Em solos orgânicos (Histossolos) da área agrícola dos Everglades no Sul da Flórida, SNYDER et al. (1986) sugerem que, para teores menores do que 3% de Si, há necessidade de adubação do arroz com silicato de cálcio (slag).

A análise da planta para Si pode ser feita por vários métodos, sendo um deles a fusão em mufla do tecido da planta em alta

temperatura (KILMER, 1965). Outro método consiste em analisar o Si no tecido da planta gravimetricamente, empregando-se o processo de digestão úmida (YOSHIDA et al., 1976; ELLIOTT et al., 1988). O ácido fluorídrico também pode ser usado para solubilizar o Si na matéria seca, e a determinação do Si pode ser feita pelo processo colorimétrico ou no espectrofotômetro de absorção atômica (NOVOZAMSKY & HOUBA, 1984; VORM, 1987). Estes métodos são trabalhosos e/ou requerem o uso de reagentes perigosos. Pensando nestes problemas, ELLIOTT & SNYDER (1991) desenvolveram um método para analisar especificamente Si em tecido de arroz, o qual consiste na digestão do material da planta em autoclave. Por este método, o tecido da planta é digerido com NaOH e H₂O₂ numa autoclave, e a determinação é feita colorimetricamente, permitindo o processamento de grande número de amostras de plantas num curto período de tempo.

DETERMINAÇÃO DO SILÍCIO EM FERTILIZANTES

Os estudos com Si tiveram início no Japão na década de 60 com os trabalhos de YOSHIDA (1965) e TAKAHASHI (1968) sobre fisiologia e resistência a pragas. Como resultados destes estudos, os produtores começaram a usar fertilizantes silicatados no cultivo do arroz. Após este período, as pesquisas com Si diminuíram até que, no final da década de 80, iniciou-se novamente outro período de intensas pesquisas sobre Si. Desta vez, os estudos enfocavam principalmente a avaliação da disponibilidade de Si no solo e fontes de fertilizantes contendo Si.

Os produtos usados como fertilizantes silicatados no Japão são basicamente subprodutos das usinas de aço, denominados de "slags". No Japão, estes "slags", para serem reconhecidos como fertilizantes silicatados, devem conter no mínimo 20% de SiO₂ extraíveis em HCl 0,5 N. Além disso, há especificações para tamanho de partícula, quantidade mínima de Ca, alcalinidade mínima (Ca + Mg solúvel em HCl) e teor máximo de Ni, Cr e Ti.

Aproximadamente 800.000 toneladas de "slag" foram usadas anualmente na década de 70; 650.000 t na de 80 e 400.000 t na de 90. As quantidades aplicadas variam de 0,5 a 1,0 t/ha, embora a dose recomendada seja de 1,5 a 2,0 t/ha. Considerando-se que 400.000 t são usadas anualmente a uma quantidade de 0,75 t/ha, conclui-se que 533.000 ha recebem anualmente adubação com Si. Considerando ainda uma área total plantada com arroz de aproximadamente 2.000.000 ha, conclui-se que no Japão 25% da área cultivada com arroz é adubada com Si.

Vários "slags", ou subprodutos de processos industriais, têm sido usados como fertilizantes silicatados. Entretanto, há uma grande variação na composição e disponibilidade de Si desses "slags" para a cultura do arroz. Por exemplo, TAKAHASHI (1981) determinou que a disponibilidade de Si era maior em "slags" que tinham sido esfriados lentamente ao ar, quando comparados com "slags" esfriados em água, e que a disponibilidade de Si aumentava com a diminuição no tamanho dos grânulos. Determinou também que a relação Ca:Si afeta a disponibilidade de Si e as relações superiores a 1,0 favorecem a absorção de Si pelas plantas. Os "slags" variam consideravelmente nos teores de Si. Os "slags" originados em usinas de aço mais puro, isto é, os "slags" denomi-

nados de "Convertor", em geral contêm menos Si (5-10%) do que os "blast furnace slags" (15-20%), que resultam da fabricação de ferro. "Slags" produzidos durante a fabricação do fósforo por processo elétrico contêm aproximadamente 20% de Si, apenas ligeiramente menor do que os minerais de jazida de silicato de cálcio, tal como a Wollastonita.

Os pesquisadores japoneses têm usado vários métodos para avaliar o Si disponível para as plantas em "slags" e outros materiais inorgânicos. No Japão, o método "oficial" de extração de Si em "slags" tem sido o HCl 0,5 M, embora muitos pesquisadores reconheçam que este método não mede com precisão a disponibilidade de Si para o arroz. O mesmo acontece quando o Si é extraído em acetato de sódio tamponado a pH 4,0 (NONAKA & TAKAHASHI, 1986).

KATO & OWA (1990) estudaram intensivamente a determinação do Si disponível em "slags" para o arroz e propuseram a extração com água (0,2 g de "slag" em 400 ml de água). O Si extraído por este método apresenta maior correlação com o Si absorvido pela planta, porém vários fatores podem influenciar a dissolução do Si no laboratório. Por exemplo, em estudos de incubação, a acumulação de Ca no sobrenadante reprime a dissolução do silicato de cálcio (KATO & OWA, 1990). O aumento de pH da solução e da concentração de sais também diminui a dissolução do Si. Como estes fatores, em condições de campo, são tamponados pelo sistema solo/planta, através da remoção de Ca pelo arroz na solução do solo e pela produção de CO₂, através da respiração das raízes, há necessidade de se considerar estes fatores quando se quer simular a dissolução de Si em laboratório. Levando-se em conta estes dois fatores, tem sido proposto o uso da resina para prevenir o aumento na concentração do Ca do sobrenadante e manter o pH próximo da neutralidade. A concentração de

Si no sobrenadante deve ser menor do que 100 mg de SiO₂/L para evitar a polimerização do Si, podendo haver necessidade de fazer ajustamento na relação slag/água. A correlação entre o Si dissolvido por este método e o Si absorvido pelo arroz tem sido maior do que para a dissolução em HCl 0,5 N ou em acetado tamponado em pH 4,0.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil é o país maior produtor de arroz da América do Sul, onde são cultivados aproximadamente 5 milhões de hectares. O arroz de sequeiro, ou mais recentemente denominado arroz de terras altas, ocupa cerca de 70% da área total cultivada no Brasil, cujos solos são predominantemente Oxissolos. Essas áreas são planas ou ligeiramente onduladas, com excelentes propriedades físicas mas com sérias limitações em relação às propriedades químicas. Entretanto, os solos, depois de corrigidos e adubados com fertilizantes, têm demonstrado ser altamente produtivos. Entre os corretivos utilizados na recuperação desses solos, o silicato de cálcio é uma das alternativas que, além de eliminar a acidez do solo, funciona como importante protetor das plantas contra os danos causados por doenças e insetos.

O óxido de silício (SiO₂) é o mineral primário mais abundante em solos tropicais e constitui a base estrutural da maioria

- MAXWELL, F.G.; JENKINS, J.N.; PARROTT, W.L. Resistance of plants to insects. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.187-265, 1972.
- MENZIES, J.G.; EHRET, D.L.; GLASS, A.D.M.; HELMER, T.; ROCH, C.; SEYWERD, F. Effects of soluble solution on the parasitic fitness of *Sphaerotheca fuliginea* on *Cucumis sativa*. **Phytopathology**, St. Paul, v.81, n.84-88, 1991.
- NAIR, P.K.; AIYER, R.S. Status of available silica in the rice soils of Kerala State (India). II. Silicon uptake by different varieties of rice in relation to available silica contributed by soil and irrigation water. **Agricultural Research Journal of Kerala**, Kerala, v.6, p.88-94, 1968.
- NAKANO, K.; ABE, G.; HIRANO, C. Silicon as an insect resistance component of host plant, found in relation between the rice stem borer and rice plant. **Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology**, Tokyo, v.5, p. 17-27, 1961.
- NAYAR, P.K.; MISRA, A.K.; PATNAIK, S. Evaluation of silica-supplying power of soils for growing rice. **Plant and Soil**, The Hague, v.47, p.487-494, 1977.
- NONAKA, K.; TAKAHASHI, K. A method of assessing the need of silicate fertilizers in paddy soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14., Kyoto, 1990. **Transactions**. Kyoto: Japanese Society of Soil Science, 1990. v.4, p.513-514.
- NONAKA, K.; TAKAHASHI, K. A method of measuring available silicates in paddy soils. **Japan Agricultural Research Quarterly**, Ibaraki, v.22, p.91-95, 1988.
- NONAKA, K.; TAKAHASHI, K. Available silicates in paddy soils. Part 1. Available silicates in various soils and slags. **Bulletin Shikoku National Agricultural Experiment Station**, Kagawa, n.47, p.1-15, 1986.
- NOVOZAMSKY, R. Van ECK; HOUBA, V.J.G. A rapid determination of silicon in plant material. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.15, p.205-211, 1984.
- OHATA, K.; KUBO, C.; KITANI, K. Relationship between susceptibility of rice plants to *Helminthosporium* blight and physiological changes in plants. **Bulletin Shikoku Agricultural Experiment Station**, Kagawa, n.25, p.1-19, 1972.
- OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. The role of silicon. In: **THE MINERAL nutrition of the rice plant**. Baltimore: Johns Hopkins, 1965. p.126-146.
- OSUNA-CANIZALES, F.J.; DeDATTA, S.K.; BONMAN, J.M. Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to blast disease of rice. **Plant and Soil**, The Hague, v.135, p.223-231, 1991.
- PARK, C.S. Silicate responses to rice in Korea. In: FOOD AND FERTILIZER TECHNOLOGY CENTER. **The fertility of paddy soils and fertilizer applications for rice**. Taiwan, 1976. p.221.
- PARK, Y.S.; OH, W.K.; PARK, C.S. A study of the silica content of the rice plant. **Research Reports of the Office Rural Development**, Suwon, v.7, n.1, p.31-38, 1964.
- SALIM, M.; SAXENA, R.C. Iron, silica and aluminum stress and varietal resistance in rice: Effects on white backed plant hopper. **Crop Science**, Madison, v.32, p.212-219, 1992.
- SAVANT, A.S.; PATIL, V.H.; SAVANT, N.K. Rice hull ash applied to seedbed reduces deadhearts in transplanted rice. **International Rice Research Notes**, Los Baños, v.19, n.4, p.21-22, 1994.
- 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.
- SNYDER, G.H. **Development of a silicon soil test for Histosol-grown rice**. Belle Glade: University of Florida, 1991. (Belle Glade EREC Res. Rep. EV-1991-2).
- SNYDER, G.H.; JONES, D.B.; GASCHO, G.J. Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p.1259-1263, 1986.
- SUBRAMANIAN, S.; GOPALASWAMY, A. Effect of silicate materials in rice crop pests. **International Rice Research Newsletter**, Los Baños, v.13, n.3, p.32, 1988.
- SUJATHA, G.; REDDY, G.P.V.; MURTHY, M.M.K. Effect of certain biochemical factors on expression of resistance of rice varieties to brown plant hopper (*Nilaparvata lugens* Stal). **Journal Research Apau**, Andhra Pradesh, v.15, p.124-128, 1987.
- SUMIDA, H. Effects of nitrogen nutrition on silica uptake by rice plant. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.63, p.633-638, 1992.
- SUMIDA, H.; OHYAMA, N. The influence of temperature on supply of silica from paddy soil and its uptake by rice plant. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.61, p.253-259, 1990.
- SUZUKI, N. Nature of resistance to blast. In: **THE RICE BLAST DISEASE**. Baltimore: John Hopkins, 1965. p.277-301.
- TAKAHASHI, K. Effects of slags on the growth and the silicon uptake by rice plants and the available silicates in paddy soils. **Bulletin Shikoku Agricultural Experiment Station**, Kagawa, n.38, 1981.
- TAKAHASHI, N. Silica as a nutrient to the rice plant. **Japan Agricultural Research Quarterly**, Ibaraki, v.3, n.3, p.14, 1968.
- TAKIJIMA, Y.; WIJAYARATNA, H.M.S.; SENEVIRATNE, C.J. Nutrient deficiency and physiological disease of lowland rice in Ceylon. III. Effect of silicate fertilizers and dolomite for increasing rice yields. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.16, p.11-16, 1970.
- TANAKA, A.; PARK, Y.D. Significance of the absorption and distribution of silica in the rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.12, p.191-195, 1966.
- VORM, P.D.J. Van der. Dry ashing of plant material and dissolution of the ash in HF for the colorimetric determination of silicon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.18, p.1181-1189, 1987.
- WINSLOW, M.D. Silicon, disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, Madison, v.32, p.1208-1213, 1992.
- YOSHIDA, S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences**, Ibaraki, v.15, p.1-58, 1965.
- YOSHIDA, S. **The physiology of silicon in rice**. Taipei: Food and Fertilization Technology Center, 1975. (FFTC. Technical Bulletin, 25).
- YOSHIDA, S.; FORNO, D.A.; COOK, J.H.; GOMEZ, K.A. **Laboratory manual for physiological studies of rice**. 3.ed. Los Baños: IRRI, 1976. 83p.
- YOSHIDA, S.; ONSHI, Y.; KITAGISHI, K. The chemical nature of silicon in rice plant. **Soil and Plant Food**, Japan, v.5, p.23-27, 1979.