

## **1-INTRODUÇÃO**

O silício é um elemento que se encontra em considerável presença na crosta terrestre, perdendo em abundância somente para o oxigênio. Devido a este fato, certas plantas possuem Si em seus tecidos, sendo cerca de 0,1 a 10% da matéria seca das mesmas.

A falta de um bom esclarecimento da sua função para as plantas faz com que o Si não tenha um devido reconhecimento como nutriente. Sua absorção, no entanto, traz inúmeros benefícios tais como: influencia na resistência das plantas aos ataques de insetos, nematóides, bactérias e fungos, na melhoria do estado nutricional, na redução da transpiração e aprimoramento na arquitetura da mesma, causando maior eficiência fotossintética.

Os diversos solos localizados na região central do Brasil, em particular as áreas cobertas por vegetação de cerrado, são lugares pobres em silício disponível para as plantas. Nessas condições, é de se esperar respostas à sua aplicação na forma de fertilizantes e/ou corretivos silicatados, principalmente em gramíneas, que são

consideradas plantas acumuladoras de Si.

As principais características de uma fonte de Si para fins de uso na agricultura são: alto conteúdo de Si-solúvel, boas propriedades físicas, facilidade para a aplicação mecanizada, pronta disponibilidade para as plantas, baixo custo, boas relações e quantidades de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) e ausência de potencial de contaminação do solo com metais pesados. Muitas escórias de siderurgia encontram-se depositadas como restos sem utilização alguma, porém algumas delas são fontes promissoras de Si disponível.

Em virtude da carência de informações e da grande demanda por fontes de Si agronomicamente eficientes e economicamente viáveis para uso na agricultura, esse trabalho tem o objetivo de avaliar materiais ricos em silício (escórias, silicatos, termofosfatos, etc) quanto a quantidade e a sua alta capacidade de fornecer Si para as plantas.

## **2- REVISÃO DE LITERATURA**

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

### **Efeito do Si no solo e nas plantas**

O Si é segundo elemento mais abundante, em peso, na crosta terrestre e componente majoritário de minerais do grupo dos silicatos (RAIJ, 1991). Ocorre em altos teores em solos, principalmente, na forma de silicatos, e no quartzo ( $\text{SiO}_2$  - mineral inerte das areias). A sílica solúvel em solos não tem sido estudado intensamente, principalmente por não ser o Si considerado essencial as plantas.

Do ponto de vista agrônômico, as principais formas de Si presentes no solo são: Si solúvel ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$  - ácido monossilícico) que desprovido de carga elétrica tem interessantes conseqüências no comportamento da sílica com relação aos vegetais (RAIJ &

CAMARGO,1973); Si adsorvido ou precipitado com óxidos de ferro e alumínio e os minerais silicatados ( cristalinos ou amorfos). A solubilidade destes minerais dependem da temperatura, pH, tamanho de partícula, composição química e presença de rachaduras (rupturas) na sua estrutura. A dissolução desses minerais é afetada também por fatores de solo tais como: matéria orgânica, teor de umidade, potencial de óxido - redução de sesquióxidos.

Os principais solos do cerrado apresentam alto grau de intemperismo, com alto potencial de lixiviação, baixa saturação de bases, baixos teores de Si trocável e baixa relação (Ki)  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e (Kr) Sílica/Sesquióxidos de Fe e Al apresentando, portanto, baixa capacidade de fornecimento de Si disponível para as plantas (BRADY, 1992; SILVA, 1973; SOILS AND RICE, 1978). Estes solos apresentam como características marcantes a baixa fertilidade natural e alta acidez, além de possuírem elevados teores de sesquióxidos de Fe e Al que contribuem para a alta capacidade de adsorção de fósforo que poderá ser reduzida com a adubação silicatada, se for comprovado seus efeitos benéficos na diminuição da adsorção do fósforo.

A absorção de Si da solução do solo dá-se de forma passiva, com o elemento acompanhando o fluxo de massa da água que penetra nas raízes das plantas. O Si é absorvido pela planta como ácido monossilícico,  $H_4SiO_4$  (JONES & HANDRECK, 1967), sugere que a sílica é absorvida pelas gramíneas através do fluxo de massa por processo não seletivo. A sílica adsorvida acumula-se nas células epidérmicas.

O Si ao ser absorvido pelas plantas é facilmente translocado no xilema, e tem tendência natural a polimerizar (BARBER & SHONE, 1966). Na planta, a sílica concentra nos tecidos suportes do caule e das folhas. Pode ser encontrada em pequenas quantidades nos grãos. O conteúdo médio de sílica das raízes é um décimo da concentração do caule. No arroz, a sílica é dita ser acumulada nas células da epiderme e nas paredes das células, além disso, como na transpiração dos órgãos sob a forma de sílica coloidal. Testes conduzidos com sílica radioativa ( $Si^{31}$ ) tem mostrado que a sílica é translocada no caule poucas horas após ter sido absorvida pelas raízes. A translocação da sílica é dita ser regulada pela taxa de transpiração. A acumulação de sílica nos órgãos de transpiração provoca a formação de uma dupla camada de sílica cuticular, a qual pela redução da

transpiração faz com que a exigência à água pelas plantas seja menor. Isso pode ser de extrema importância em solos de cerrado, onde o período de estiagem é longo e severo.

Na Índia, em condições tropicais sub-úmidas, doze cultivares de arroz removeram em média de 205 a 611 kg de Si ha<sup>-1</sup> para produzirem de 4,6 a 8,4 ton ha<sup>-1</sup> de arroz, comprovando a alta exigência em Si pelo arroz (NAYAR et al., 1982).

### **Fontes de Si**

Entre as fontes de Si mais utilizadas, citam-se a Wollastonita, escórias de siderurgia, silicato de cálcio (sub-produto da produção do fósforo elementar) e o cimento (SNYDER et al., 1986). Doses de Si depende da fonte, do tipo de solo e da cultura em questão. Estudos indicam que doses variando de 1,5 a 2,0 ton ha<sup>-1</sup> de silicato de cálcio foram adequadas para uma boa produção de arroz no Japão, Korea e Taiwan (DeDATTA, 1981).

No Japão, 25% da área cultivada com arroz recebe anualmente adubações com silicato de cálcio que variam de 0,5 a 1,0 ton ha<sup>-1</sup>, embora a quantidade recomendada seja de 1,5 a 2,0 ton ha<sup>-1</sup>. Uma boa colheita de arroz chega a extrair 1,5 ton ha<sup>-1</sup> de SiO<sub>2</sub> (MALAVOLTA, 1978).

Novos fertilizantes silicatados vem sendo desenvolvidos. Dentre eles, há o Fosfato de Magnésio contendo de 16 a 26% de citrato solúvel de Si. É novidade o Silicato de Potássio que, diferente de outras escórias, a aplicação é calculada com base no potássio contido nesse fertilizante. A sílica gel apareceu no mercado em 1999, sendo um fertilizante constituído puramente de Si, sem qualquer contaminação de outros elementos, porém, devido ao seu alto preço tem a sua aplicação limitada.

Alguns ácidos fracos podem, entretanto, diferenciar melhor a viabilidade agronômica do Si presente em certos compostos. A extração do fertilizante com ácidos fracos (ácido cítrico) é uma alternativa que merece ser testada. A indústria de fertilizantes Mitsui (Brasil) desenvolveu um método baseado na extração com ácido cítrico 2%. Esse método apresenta um grande potencial para se avaliar a eficiência de fontes de Si em laboratório.

Uma segunda alternativa para se avaliar a eficiência de fontes de Si é o método da incubação que consiste na mistura das fontes com o solo e depois de um determinado período de tempo mede-se a quantidade de Si disponível no solo. MEDINA-GONZALES

et al. (1988) utilizaram o mesmo teste para avaliar duas fontes de Si e dois tamanhos de partículas na região do Havaí. Nesse trabalho foram usados sacos plásticos e o solo incubado próximo à capacidade de campo. Depois de 60 dias de incubação o Si foi analisado utilizando-se a água como extrator, 0,5M acetato de amônio e pasta saturada. O Si extraído foi determinado nas raízes da cana-de-açúcar. Os autores encontraram que a fonte  $\text{CaSiO}_3$  foi mais eficiente que o  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  e que, em geral, as partículas de menor tamanho aumentam a liberação do Si para as plantas. Ainda nesse mesmo estudo, os autores observaram que a absorção de Si pelas raízes foi melhor relacionada com a extração com água seguida da pasta saturada e por último com acetato de amônia.

A aplicação de silicatos finamente moídos ao solo é prática agronômica e comercial no Havaí e em outras partes do mundo por causa dos aumentos de produtividade. O efeito positivo dos silicatos são normalmente associados ao aumento na disponibilidade do Si-solúvel ou “disponível”, ao aumento do pH e ao aumento de micronutrientes que esses produtos podem conter. O Si pode atuar ainda na redução do Fe e Mn tóxicos para as plantas.

IMAIZUMI & YOSHIDA (1958) estabeleceram um critério para aplicação de fertilizantes silicatados, segundo o qual, a cultura do arroz responderia ao Si no solo se a quantidade extraível em acetato de sódio (pH 4,0) fosse menor do que 4,9 mg 100g<sup>-1</sup> de Si.

A adição de termofosfato (fertilizante fosfatado) ao solo como fonte de Si mostrou-se bastante satisfatória para a cultura do arroz (FREIRE et al., 1985). Esse resultado, em grande parte foi atribuído ao Si porque este aumenta o poder oxidante das raízes de arroz, favorecendo a oxidação e deposição (precipitação) do Fe na superfície das raízes, diminuindo assim a sua absorção pela planta e efeito tóxico. Segundo OKUDA & TAKAHASHI (1964) o Si aumenta o suprimento de oxigênio para as raízes e seu poder de oxidação, na proporção que é absorvido pela planta. Além disso, segundo os autores acima citados plantas desenvolvidas em solução nutritiva contendo Si produziram mais matéria verde, aumentaram a relação P/Fe e P/Mn e promove a translocação do fósforo absorvido para a parte aérea e panículas.

### **Escórias Siderúrgicas**

As escórias siderúrgicas são resíduos da metalurgia do ferro, através de processamento em altas temperaturas, geralmente acima de 1900° C. Nesse processo uma carga composta por minério de ferro (hematita Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), limonita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2H<sub>2</sub>O) ou magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), carvão coque e um fundente, calcário (CaCO<sub>3</sub>), é introduzida na parte superior do forno e, através da ação térmica, é obtido o ferro-gusa e a escória.

A escória é o produto da reação do calcário com a sílica (SiO<sub>2</sub>), principal impureza presente no minério de ferro:



A cada 4 toneladas de ferro-gusa produzidas, é gerada em média 1 tonelada de escória de alto forno (COELHO, 1998).

O Brasil é o sexto maior produtor mundial de ferro-gusa, com uma produção anual de cerca de 25 milhões de toneladas, o que corresponde à geração de cerca de 6,25 milhões de toneladas de escória por ano. O Estado de Minas Gerais é o maior produtor nacional, responsável por mais da metade de todo ferro-gusa produzido internamente.

Em seu estado original, a escória é um material granulado de composição química e granulométrica bastante variável, em função do tipo de processamento, do minério de ferro e do sistema de granulação utilizado (Quadro 1).

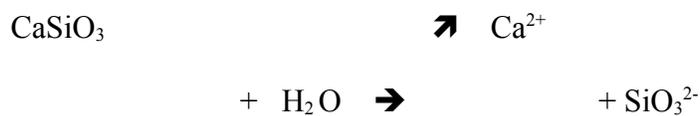
Quadro 1. Composição química da escória de alto forno de diferentes procedências, em %.

<b>Origem da Escória</b>	<b>FeO</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>S</b>
<b>MANESMANN</b>										
<b>Alto Forno 1</b>	1,8	-	2,4	44,5	13,1	30,1	5,5	0,05	1,2	0,08
<b>Alto Forno 2-CV</b>	0,5	-	1,3	41,2	11,2	32,7	11,9	0,02	0,9	0,08
<b>Alto Forno 2-CQ</b>	0,2	-	1,3	35,0	12,1	35,4	14,6	0,02	0,2	0,8
<b>Forno LD</b>	17,2	9,6	4,8	12,2	1,4	47,6	5,7	1,3	0	0,05
<b>Forno Elétrico</b>	13,9	8,5	7,5	12,5	5,0	44,5	6,5	1,0	0	0,18
<b>Baixo Forno 1</b>	0,09	-	0,4	35,7	15,9	36,6	10,2	0,02	0,7	0,08
<b>Baixo Forno 2</b>	0,06	-	0,4	36,4	16,0	35,8	10,3	0,02	0,7	0,06
<b>COSIPA</b>										
<b>Alto Forno 2</b>	-	-	0,70	35,5	10,5	42,75	7,83	-	-	1,27

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA et al., 1994; COSIPA, 1999 (comunicação pessoal).

Durante o processo para a obtenção do ferro gusa, a sílica do minério de ferro reage com o cálcio do calcário no alto forno transformando-se em um silicato de cálcio com impurezas. O material fundido é resfriado ao ar, na água, seco e moído.

As escórias básicas de siderurgia podem ser utilizadas como corretivos de solo, e também como fonte de nutrientes. São formadas principalmente de silicato de cálcio e magnésio contendo impurezas tais como P, S, Fe, Zn, Cu, B, Mo, Co. Os silicatos comportam-se de maneira similar aos carbonatos no solo. São capazes de elevar o pH, neutralizando o Al trocável e outros elementos tóxicos. De acordo com ALCARDE (1992), as reações de materiais silicatados que ocorrem no solo são:





As escórias são ricas em Ca e Mg e apresentam ainda, em sua composição, alguns dos principais macro e micronutrientes como o P, o Fe e o Mn (KLUGER, 1989).

A alta concentração de carbonatos de cálcio e magnésio sugere sua utilização como corretivo de acidez do solo e como fonte de Ca e Mg para as plantas, em substituição ou como complemento à adubação tradicional desses elementos, especialmente para solos arenosos de baixíssima fertilidade.

Comparada ao calcário, a eficiência agronômica da escória varia de acordo com a granulometria, a dosagem, o tipo de solo e o tempo de contato com o solo (PIAU, 1991; NOVAIS et al., 1995; AMARAL SOBRINHO et al., 1993; OLIVEIRA et al., 1994).

A escória de alto forno apresenta maior liberação de K e a de aciaria maior disponibilidade de Ca. A granulometria mais fina permite a ambas uma maior reatividade com o solo, tanto nos arenosos como nos argilo-arenosos (NOVAIS et al., 1995). Escórias de alto forno com partículas menores que 0,3 mm são mais eficientes no fornecimento de

Ca e Mg para o solo, enquanto que as mais grosseiras, com partículas maiores que 2 mm, são as menos efetivas (OLIVEIRA et al., 1994).

Quadro 2. Concentração de metais pesados e outros elementos químicos em escória de alto forno.

<b>Elemento</b>	<b>Concentração</b>	<b>Elemento</b>	<b>Concentração</b>
	g kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>
<b>Ca</b>	270	<b>Mo</b>	26
<b>Mg</b>	37	<b>Zn</b>	545
<b>K</b>	7,8	<b>Cu</b>	358
<b>P</b>	0,5	<b>B</b>	84
<b>S</b>	0,4	<b>Pb</b>	205
<b>Fe</b>	35,2	<b>Cr</b>	975
<b>Al</b>	34,8	<b>Ba</b>	341
<b>Ti</b>	2,0	<b>Cd</b>	16
<b>Mn</b>	14,0	<b>Sr</b>	1279
		<b>Co</b>	20

Fonte: Piau, 1991.

Quanto à contaminação do solo por metais pesados, estimativas realizadas por AMARAL SOBRINHO et al. (1995) sugerem que aplicações anuais de até 25 MG ha<sup>-1</sup>, realizadas num período de 10 anos, não resultaram em contaminação.

#### **Efeito do Si na produtividade**

Os benefícios do Si variam de uma espécie vegetal para outra. Muitos estudos mostram que o Si tem efeito direto e indireto no crescimento do arroz (TAKAHASHI et al., 1990). Em sementeiras, aplicações de silicato aumentou o número de folhas e o peso seco das plantas de arroz (LEE et al., 1985). O Si também aumentou o número de espiguetas na panícula e favoreceu uma melhor formação da casca dos grãos, influenciando na qualidade destes (SEO & OTA, 1983; MIZUNO, 1987; LEE et al., 1990; KORNDÖRFER et al., 1999). Ganhos significativos na produção de grãos também tem sido observado no Japão, Tailândia, Indonésia, China, Colômbia, Filipinas e na Florida (TAKAHASHI et al., 1980; HO et al., 1980; BURBEY et al., 1988; IRRI, 1993; SUBRAMANIAN & GOPALSWAMY, 1990, GARRITY et al., 1989; CORREA-VICTORIA et al., 1994; KORNDÖRFER & LEPSCH, 1999).

### **3- MATERIAL E MÉTODOS**

**Fontes de Si**

As fontes a serem utilizadas foram definidas em função do potencial de uso na agricultura e da capacidade de fornecimento de Si. Os materiais foram caracterizados quanto à sua origem, teores de Si-total, Ca, Mg e Poder de Neutralização (PN), conforme apresentados na Tabela 1.

Como fonte padrão de comparação foi usado a Wollastonita, produto mundialmente utilizada em estudos com Si e que apresenta um alto grau de pureza, rico em de  $\text{CaSiO}_3$ . As amostras de escórias foram secas e peneiradas passando por uma malha de 50 mesh.

**Tabela 1.** Caracterização química das fontes de Si

Material	Origem	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PN	PN
		Total	g kg <sup>-1</sup>		calculado	Determinado
					%CaCO <sub>3</sub>	%CaCO <sub>3</sub>
Wollastonita	Vanzil	502	424	1	76	73
Escória de alto-forno	Silifértil	383	301	75	72	70
Escória de LD	Silifértil	122	409	72	91	90
Escória de P elementar	Rhodia	461	435	6	79	63
MB-4	MIBASA	428	70	107	39	33
Escória de alto-forno	CSN	333	425	52	89	87
Escória de LD	CSN	109	281	76	69	96
Escória de AOD	Acesita	100	564	57	115	118
Escória de LD	Belgo Mineira	173	395	95	94	102
Escória forno elétrico	Belgo (Siderme)	158	257	125	77	95
Escória de aço inox	Recmix	232	366	94	89	87
Escória de LD	Açominas	111	276	28	56	91

### Estudo do Si acumulado na planta de arroz

O trabalho foi realizado em casa de vegetação do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia utilizando-se um Delineamento Inteiramente Casualizados (DIC), com a cultura do arroz para determinar a reatividade e a velocidade de liberação do Si proveniente dos materiais (escórias) no solo. O solo usado é classificado como Neossolo Quartzarênico e apresenta baixo teor de Si (Tabela 2).

**Tabela 2.** Características do solo usado no experimento.

Solo	pH	P*	Si	Al	Ca	Mg	SB	t	CTC	SB	m	M.O.
		---mg dm <sup>-3</sup> ---	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		-----g kg <sup>-1</sup> -----				-----%			
AQa	4,4	56,0	3,3	1,00	0,20	0,10	0,39	1,40	5,20	7	71	15

\*Fósforo extraído por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025N + HCl 0,05N

A aplicação dos tratamentos foi realizada em vasos com 5 kg de solo seco conforme apresentados na Tabela 3. Em seguida, o solo foi umedecido até próximo a 70% da capacidade de campo para que as reações químicas ocorressem. A quantidade de água aplicada para cada vaso foi de 860mL. Somando a água aplicada ao peso do solo, 5,86kg + 0,3kg da tara do vaso, totalizou 6,16kg por vaso. Esse peso serviu como parâmetro para verificar a evaporação de água que foi repostada durante o período de incubação. O solo foi incubado por cerca de 40 dias e, ao final do período foi realizado o plantio da cultura de arroz.

**Tabela 3.** Características dos tratamentos aplicados no experimento

Tratamentos	Teor Si	Dose Si	Dose	Dose*	Dose*	<b>Dose</b>	Dose	Dose
	g kg <sup>-1</sup>	-----mg kg <sup>-1</sup> -----	Produto	Ca	Mg	Produto	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>
							-----g vaso <sup>-1</sup> -----	
Testemunha	-	-	-	0	0	-	12,6	2,2
Wollastonita	234	125	533	162	1	2,6	10,7	2,2
Silifertil AF	179	125	698	150	31	3,4	10,8	1,7
Silifertil LD	57	125	2182	638	95	10,9	5,1	0,5
Rhodia	215	125	581	181	2	2,9	10,5	2,2
MB-4	199	125	625	31	40	3,1	12,2	1,5
CSN AF	155	125	802	244	25	4,0	9,7	1,8
CSN LD	50	125	2455	494	112	12,2	6,8	0,2
Acesita	47	125	2655	1070	92	13,2	0,0	0,6
Belgo LD	81	125	1541	435	88	7,7	7,5	0,7
Belgo (Siderme)	73	125	1692	311	128	8,4	8,9	0,0
Recmix	108	125	1154	302	65	5,7	9,0	1,1
Açominas LD	52	125	2394	472	41	11,9	7,0	1,5

\* Dose de Ca e Mg fornecido pelos produtos

\*\* Dose de CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub> para igualar os teores de Ca e Mg aplicado nos tratamentos

Os nutrientes associados às fontes foram integralmente balanceados de tal forma que todos os vasos receberam quantidades iguais de nutrientes. Além disso, quantidades suficientes de nutrientes (N, P, K, etc) foram adicionados ao solo com o objetivo de atender às necessidades das plantas de arroz. Depois de formada a terceira folha, os vasos foram

inundados com uma lâmina de água de aproximadamente 1 cm quando então foi realizado o desbaste para 20 plantas por vaso. A colheita para avaliação da produtividade foi realizada com aproximadamente 150 dias de idade.

#### **Avaliação do Si absorvido e/ou acumulado**

A análise do Si nas plantas de arroz foi feita separando-se talo, folha e após a análises destas partes da planta inteira. O procedimento analítico foi segundo método descrito por Elliott & Snyder (1991) adaptado e consiste no seguinte:

**a) Extração:** pesou-se 0,100g de material foliar seco e moído e colocou-se em tubos plásticos. A seguir, foram adicionados 2 mL da solução de peróxido de hidrogênio a 50% volume por volume ( $H_2O_2$ ) mais 3 mL de hidróxido de sódio 50% massa por volume (NaOH) à temperatura ambiente. Após agitação os tubos foram autoclavados por 1 hora a 1,5 atmosfera de pressão a 123°C. Depois da autoclavagem as amostras foram transferidas para um balão volumétrico de 50 mL e completado o volume.

**b) Determinação:** do extrato retirou-se uma alíquota de 5 mL do sobrenadante em copo plástico de 50 mL e acrescentou-se 15mL de água destilada. Às amostras acrescentou-se 2 mL de molibdato de amônio para a formação do complexo amarelo ácido sílico-molíbídico. A formação do complexo ácido sílico-molíbídico é máxima entre pH 1,0 e 2,0. Para baixar o pH das amostras 1 mL de HCl (1:1 ou 50%) foi adicionado. A cor amarela apareceu em todas as amostras contendo Si. Depois de 5 a 10 minutos, adicionou-se, 2 ml de ácido oxálico para eliminar a interferência do P e do Fe. A leitura das amostras foram feitas em espectrofotômetro com fibra ótica após um intervalo de 2 minutos usando o comprimento de onda de 410 nm.

### **Avaliação do Si no solo**

Após a colheita do experimento, amostras homogêneas de solo foram retiradas de dentro de cada vaso, secas ao ar e depois analisadas quanto ao Si "disponível" em ácido acético 0,5 M e  $\text{CaCl}_2$  0,0025M.

A determinação do Si nos diferentes extratos foi realizada através da formação do complexo beta-molibdosilícico adicionando-se 1  $\text{cm}^3$  da solução sulfo-molíbica 75  $\text{g kg}^{-1}$  (7,5 g de molibdato de amônio + 10  $\text{cm}^3$  de ácido sulfúrico). Após 10 minutos foram acrescentados 2  $\text{cm}^3$  de ácido tartárico 200  $\text{g kg}^{-1}$  e após 5 minutos o complexo foi reduzido com 10  $\text{cm}^3$  de ácido ascórbico 3  $\text{g kg}^{-1}$ . Depois de uma hora de repouso para desenvolvimento de cor foi feita a leitura do Si em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm (Kilmer, 1965).

### **Avaliação da biomassa**

A biomassa foi avaliada quanto à produção de matéria seca e produção de grãos. O vegetal retirado dos vasos foram secos em estufa para retirar a água. O silício acumulado foi avaliado, multiplicando-se os teores de silício obtidos pela massa de cada tratamento.

### **Delineamento estatístico**

O ensaio foi conduzido utilizando-se um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) . A análise de variância foi calculada pelo programa SANEST e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Para a análise dos efeitos das doses de Wollastonita foi empregada a regressão polinomial.

#### 4-RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Wollastonita, usada como padrão, apresentou comportamento linear na absorção de silício com o aumento nas doses aplicadas em todas as análises (Figura 1).

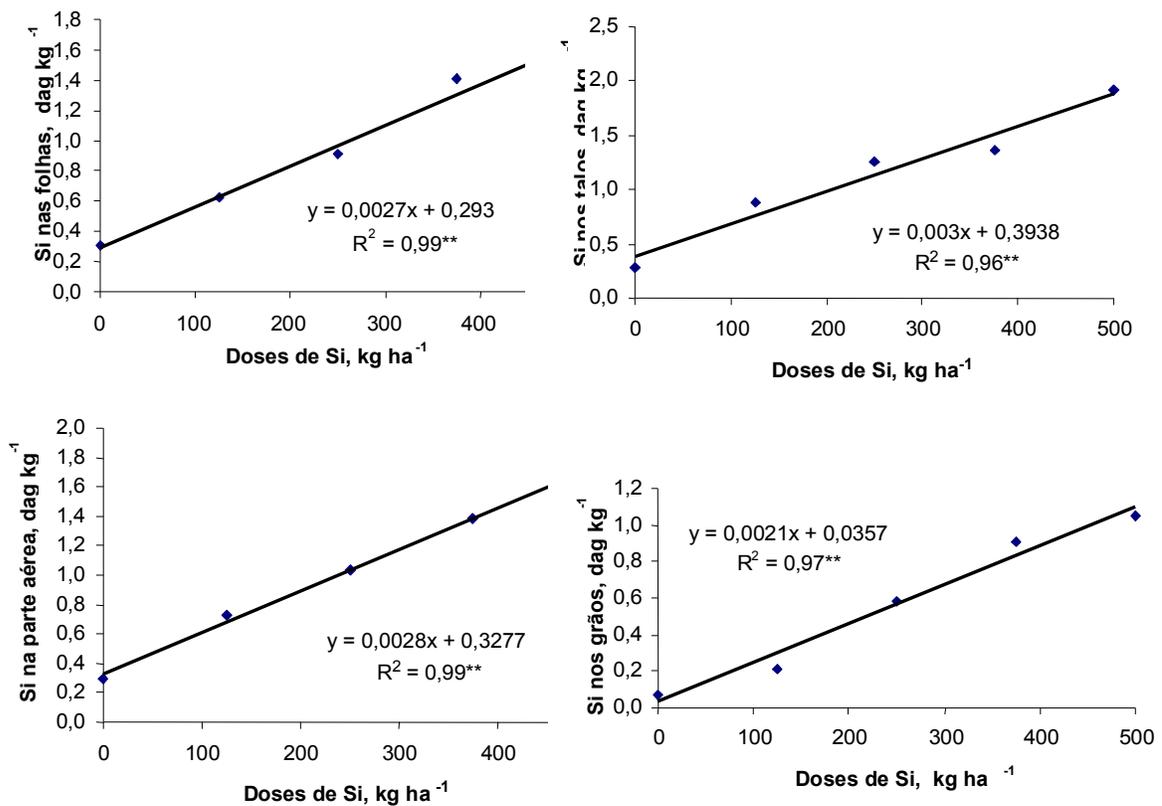


Figura 1. Efeito das doses de Silício(Wollastonita) sobre o teor de Si na parte aérea.

Comparando-se as fontes testadas, observa-se uma variação bastante significativa entre elas (Tabela 4), sendo que a melhor fonte quanto a absorção de silício foi a da Rhodia, seguida pela Wollastonita e pela Siderme que não diferiram entre si em todas as partes da planta analisada. A Recmix e a Belgo diferiram destas apenas no teor de Si da parte aérea. A Acesita já diferiu no teor de Si das folhas e parte aérea e a CSN LD no teor de Si do talo e da parte aérea.

A fonte que apresentou o pior resultado foi a MB-4 que não diferiu do tratamento testemunha, seguido da CSN de autoforno, Silifertil de autoforno, da Cinza de xisto, do Xisto e da Açominas.

**Tabela 4.** Teor de Si na parte aérea da cultura do arroz.

Tratamentos	Si			
	talo	folhas	talo + folha	grãos
	----- dag kg <sup>-1</sup> -----			
Testemunha	0,29 e	0,30 ef	0,30 hi	0,07 c
Wollastonita	0,89a	0,62ac	0,72ab	0,21ac
Silifertil AF	0,39 de	0,48 ce	0,45 eh	0,31ac
Silifertil LD	0,57 bd	0,54 bc	0,55 ce	0,37ab
CSN AF	0,37 de	0,30 ef	0,33 hi	0,18 bc
CSN LD	0,45 ce	0,61ac	0,54 cf	0,35ab
Rhodia	0,79ab	0,76a	0,77a	0,44a
MB - 4	0,28 e	0,27 f	0,27 i	0,25ac
Belgo LD	0,65ac	0,58ac	0,60 bd	0,36ab
Açominas	0,49 ce	0,50 cd	0,49 dg	0,27ac
Recmix	0,64ac	0,59ac	0,61 bd	0,40ab
Siderme	0,64ac	0,68ab	0,67abc	0,38ab
Acesita	0,67ac	0,55 bc	0,60 be	0,28ac
Xisto	0,51 ce	0,31 ef	0,39 fi	0,27ac
Cinza	0,42 ce	0,34 df	0,37 gi	0,27ac
C.V. (%)	18,5	14,3	12,0	33,1
Valor de F	12,92**	19,28**	26,13**	3,76**
dms 5%	0,25	0,18	0,16	0,25

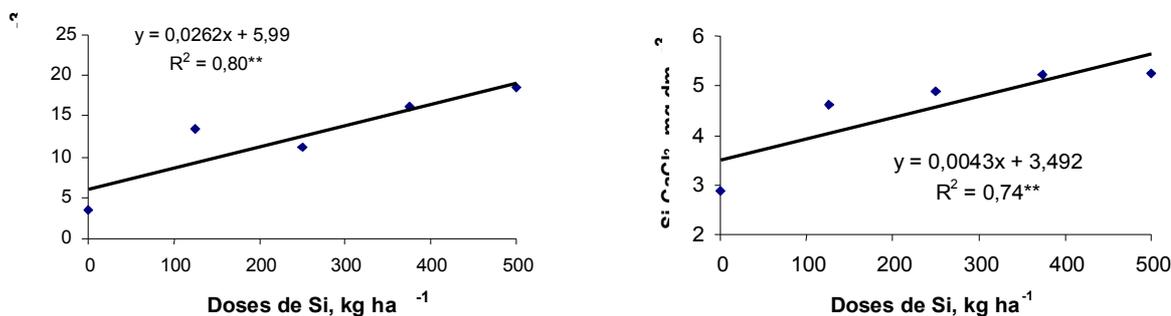
\*\* Significativo ao nível de 1 e 5% de probabilidade  
Letras nas colunas diferem entre si no teste de Tukey

De forma geral pode-se observar que as escórias de aciaria apresentaram maior disponibilidade de Si que as de autoforno, e estas escórias também apresentaram diferenças de

solubilidade entre si, em função do tipo de aço que é produzido e do tipo de forno que é usado na produção do aço.

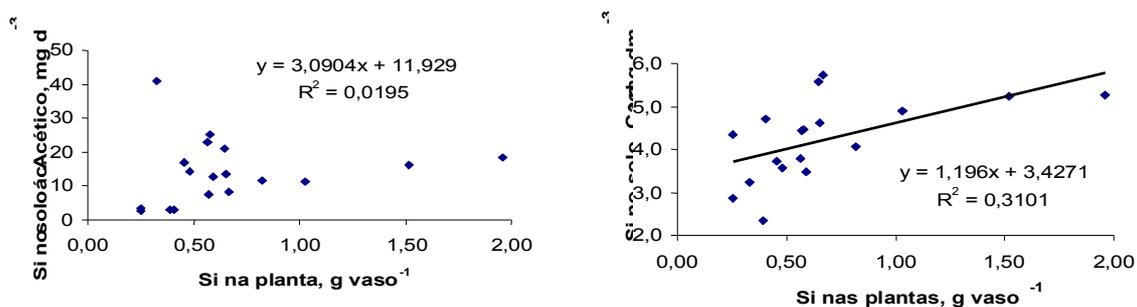
Assim como na planta, o teor de Si no solo apresentou crescimento linear com o aumento nas doses de Wollastonita (Figura 2). Quando são analisados os resultados das fontes, já não se encontra uma boa correlação entre o Si da planta com o Si do solo (Figura 3). Observa-se que a CSN de autoforno foi a fonte que mais liberou Si (Tabela 5), mas não foi o tratamento com maior absorção pela planta, sendo o inverso. Isto ocorre devido a solubilidade do Si da própria fonte pelo ácido acético. Fato parecido também ocorre com o fósforo quando usamos o duplo ácido para analisar este elemento em solos onde foi aplicado o fosfato natural. Os resultados superestimam este elemento devido a solubilização de fósforo insolúvel no solo pelo ácido. A Wollastonita apresenta boa correlação entre Si no solo e Si absorvido pela planta, por este método, porque esta fonte é praticamente insolúvel em ácido acético sendo que o Si determinado no solo é realmente o Si liberado pela fonte.

Resultados de Si no solo também foram obtidos usando o extrator  $\text{CaCl}_2$ . Verificou-se uma melhor correlação com este extrator comparado com o ácido acético 0,5M, contrariando os resultados de Korndorfer, et al. (1999) onde os autores, trabalhando com uma única fonte de Si, concluíram que o ácido acético é superior ao cloreto de cálcio. Este resultado, seguramente se deve ao número de fontes testadas no presente trabalho. Algumas fontes apresentam solubilidade em ácido acético e não em  $\text{CaCl}_2$ , assim, o ácido acético pode atacar o material aplicado no solo que não é disponível para as plantas e assim superestimar a disponibilidade do Si.. Apesar disso, o ácido acético ainda pode ser considerado o melhor extrator devido a sua maior capacidade de extração, aproximadamente 4 vezes maior em relação ao  $\text{CaCl}_2$ .



**Figura 2.** Efeito das doses de silício (Wollastonita) sobre o teor de Si no solo, extraído com ácido acético e cloreto de cálcio.

Devido as limitações metodológicas na determinação do Si no solo, a maior extração de Si pelo ácido acético, pode ser considerada de grande relevância e por isso justifica-se a manutenção desta metodologia, além disso, toda a calibração de análise de solo para Si foi realizada utilizando-se o ácido acético. Assim sendo, sugere-se continuar utilizando o atual extrator (ácido acético) mas que se tenha o cuidado em identificar aquelas fontes de Si solúveis no referido extrator para que não se superestime os teores de Si disponível no solo.



**Figura 3.** Correlação entre Si do solo e o Si extraído pelas plantas de arroz

**Tabela 5.** Teor de Si no solo determinado por dois extratores após a aplicação das diferentes fontes de Si

Tratamentos	Si extraído ácido acético		Si extraído CaCl <sub>2</sub>	
	-----mg kg <sup>-1</sup> -----			
<b>Testemunha</b>	3,5	e	2,86	de
<b>Wollastonita</b>	13,5	be	4,63	ad
<b>Silifertil AF</b>	16,9	bd	3,71	ce
<b>Silifertil LD</b>	12,7	ce	3,48	ce
<b>CSN AF</b>	41,1	a	3,23	ce
<b>CSN LD</b>	23,0	bc	3,77	be
<b>Rhodia</b>	11,6	ce	4,07	ae
<b>MB – 4</b>	2,8	e	4,34	ad
<b>Belgo LD</b>	25,1	b	4,45	ad
<b>Açominas</b>	14,1	be	3,56	ce
<b>Recmix</b>	20,9	bc	5,58	ab
<b>Siderme</b>	8,3	de	5,72	a
<b>Acesita</b>	7,4	de	4,43	ad
<b>Xisto</b>	2,9	e	4,72	ac
<b>Cinza</b>	3,1	e	2,33	e
C.V. (%)	34,5		17,6	
Valor de F	19,7**		6,8**	
dms 5%	12,1		1,8	

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade

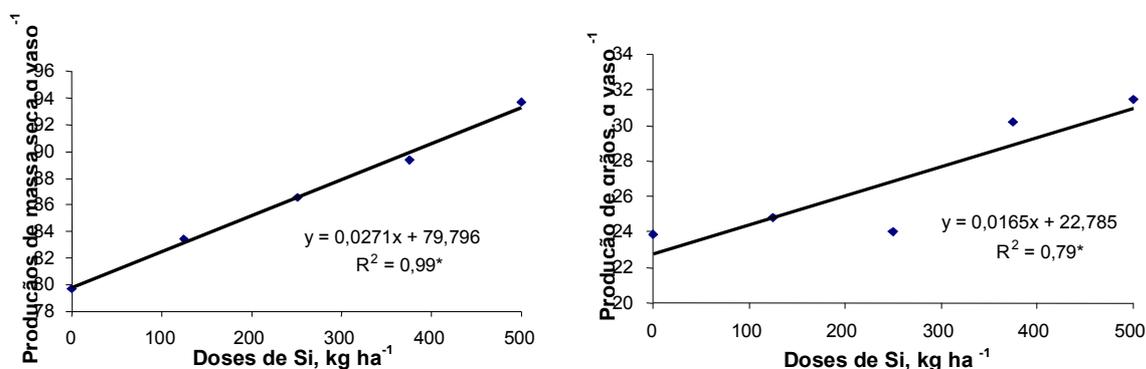
Letras nas colunas diferem entre si no teste de Tukey

Quanto a produção de matéria seca pela cultura do arroz, a Wollastonita também apresentou aumentos lineares em função das doses crescentes de Si conforme pode ser observado na Figura 4. Isto reforça a idéia de que o Si é realmente importante para o arroz, mas entre as fontes a única diferença significativa ocorreu na produção de grãos entre os tratamentos da Recmix (maior produção) e da MB-4 (menor produção). A dose de 125 kg ha<sup>-1</sup> talvez não tenha sido suficiente para evidenciar diferenças mais expressivas entre as fontes, em vista a resposta linear da Wollastonita com o aumento na dose, onde a maior dose também foi a maior produção.

**Tabela 6.** Resultados da produção de massa seca, de grãos e total da cultura do arroz.

Fontes Si	Produção	Produção	Produção total
	massa seca	grãos	(parte aérea + grãos)
-----g vaso <sup>-1</sup> -----			
Testemunha	79,7	23,9ab	103,7
Wollastonita	83,4	24,9ab	108,3
Silifertil AF	86,2	21,5ab	107,7
Silifertil LD	89,3	26,4ab	115,6
CSN AF	87,0	24,3ab	111,3
CSN LD	89,2	24,8ab	114,1
Rhodia	91,8	24,1ab	115,9
MB – 4	79,0	15,5 b	94,5
Belgo LD	81,6	23,9ab	105,6
Açominas	84,6	25,5ab	110,2
Recmix	83,3	33,5a	116,9
Siderme	86,4	24,4ab	110,8
Acesita	84,8	24,8ab	109,6
Xisto	83,5	26,5ab	109,9
Cinza	91,1	25,9ab	117,0
C.V. (%)	7,5	19,2	8,3
Valor de F	1,43	2,33*	1,68
dms 5%	16,33	12,03	23,19

Na extração de Si pelas plantas a Rhodia também foi a fonte que mais extraiu, seguindo da Wollastonita que diferiu na extração de Si dos grãos e da Siderme que diferiu na extração de Si da massa seca, mas ambas não diferiram na extração total de Si como apresentado na Tabela 7.

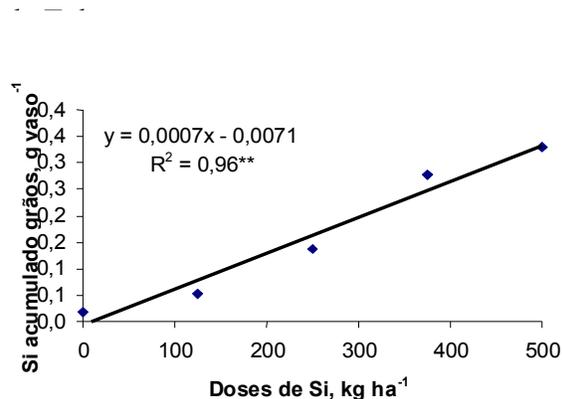
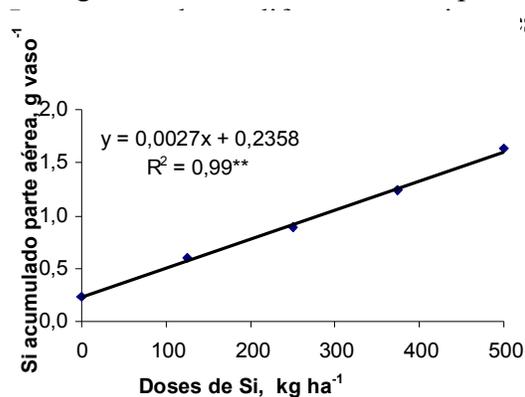


**Figura 4.** Efeito das doses de silício (Wollastonita) sobre a produção da cultura do arroz.

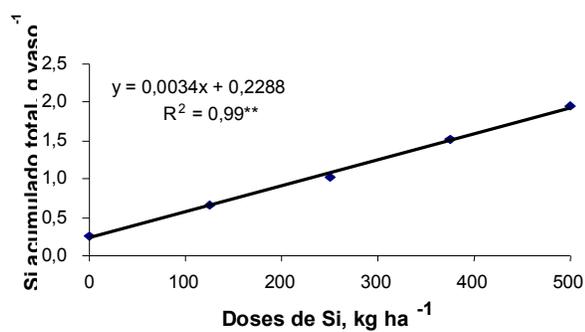
**Tabela 7.** Si acumulado na parte aérea das plantas de arroz.

Tratamentos	Si acumulado na parte aérea (sem grãos)		Si acumulado grãos		Si acumulado total (parte aérea + grãos)	
	-----g vaso <sup>-1</sup> -----					
Testemunha	0,24	e	0,02	C	0,25	g
Wollastonita	0,60	ab	0,05	Bc	0,66	ab
Silifertil AF	0,38	cd	0,07	Abc	0,45	def
Silifertil LD	0,49	bc	0,10	Ab	0,59	bcd
CSN AF	0,29	de	0,04	Bc	0,33	fg
CSN LD	0,48	bc	0,08	Abc	0,57	bcde
Rhodia	0,71	a	0,11	Ab	0,82	a
MB – 4	0,21	e	0,04	Bc	0,25	g
Belgo LD	0,49	bc	0,08	Abc	0,58	bcd
Açominas	0,42	cd	0,07	Abc	0,48	cdef
Recmix	0,51	bc	0,13	A	0,64	bc
Siderme	0,57	b	0,09	Abc	0,66	ab
Acesita	0,50	bc	0,07	Abc	0,57	bcd
Xisto	0,32	de	0,07	Abc	0,39	fg
Cinza	0,34	de	0,07	Abc	0,41	efg
C.V. (%)	12,5		39,5		12,5	
Valor de F	26,71**		3,93**		25,71**	
dms 5%	0,14		0,07		0,16	

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade



....Continua....



**Figura 5.** Efeito das doses de silício(Wollastonita) sobre a acumulação de Si na parte aérea da cultura do arroz.

A Recmix foi a fonte que mais disponibilizou Si para a produção de grãos devido sua maior produtividade e foi a quarta fonte na extração total de Si, seguido pela Silifetil

LD, Belgo, Acesita, CSN LD e Açominas. As fontes que menos apresentaram extração de Si, novamente foram a MB-4 e a CSN de auto forno que também não diferiram da testemunha seguidas do Xisto, da Cinza de xisto e da Silifetil de auto forno.

## **5- CONCLUSÃO**

- As fontes que melhor apresentaram acúmulo de Si foi a da Rhodia, seguida pela Wollastonita e pela Siderme.
- A Recmix e a Belgo diferiram das anteriormente mencionadas, apenas no teor de Si da parte aérea.
- A Acesita diferiu-se no teor de Si das folhas e parte aérea e a CSN LD no teor de Si do talo e da parte aérea.
- A fonte que demonstrou o pior resultado foi a MB-4 que não distinguiu da testemunha, seguido da CSN de alto-forno, Silifétil de alto-forno, da Cinza de xisto, do Xisto e da Açominas.
- A Wollastonita respondeu positivamente a absorção, produção e acúmulo de Si em função do aumento das doses.
- O  $\text{CaCl}_2$  foi considerado como melhor extrator em relação ao Ácido Acético para avaliar o Si “disponível” às plantas em solos onde foram aplicados materiais contendo Si.

## **6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDERSON, D. R., D. B. JONES,; G. H. SNYDER. 1987. **Response of a rice-sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols.** Agron. J. 79:531-535.

AYRES, A. S., 1966. **Calcium silicate slag as a growth stimulant for sugarcane on low silicon soils.** Solo Sci. 101:216-227.

RODRIGUES, F.A. 2000. **Fertilização silicatada na severidade da queima das bainhas (*Rhizoctonia solani* Kühn) do arroz.** Universidade Federal de Viçosa, Dep. De Fitopatologia (Dissertação de Mestrado), Março/2000. Orientador: Prof. Francisco Xavier R. do Vale.

ELLIOTT, C. L.; G. H. SNYDER. 1991. **Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw.** J. Agric. Food Chem. 39:1118-1119.

FARIA, R. 2000. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz do sequeiro ao déficit hídrico do solo.** Universidade Federal de Lavras, Dep. de Solos (Dissertação de Mestrado), Março/2000. Orientador: Prof. Gaspar H. Korndörfer

FOX , R. L., J. A. SILVA, O. R. YOUNGE, D. L. PLUCKNETT,; G. D. SHERMAN. 1967. **Soluble and total silicon in sugarcane.** Solo Sci. Am. Proc. 31:775-779.

GASCHO, G. J. 1978. **Response of sugarcane to calcium silicate slag. I. Mechanisms of response in Florida.** Solo Crop Sci. Soc. Fla., Proc. 37:55-57.

GASCHO, G. J.; H. J. ANDRIES. 1974. **Sugarcane response to calcium silicate slag applied to organic and areia soils.** Int. Soc. Sugar Cane Teechnol., Proc. 15:543-551.

HALAIS, P. 1968. **Silicon, calcium and manganese contents of cane leaf sheaths collected on ten great soil groups in Mauritius.** Proc., 13 Cong. Int. Soc. Surar Cane Technol. (Taiwan) pp. 756-762.

HOAGLAND D. R.; D. I. ARNON. 1950 **The water-culture method for growing plants without soil.** The College of Agric., Univ. of Calif., Berkley Cir. 347. 32 pp.

KORNDÖRFER, G.H. & L. E. DATNOFF, 2000. **Papel do silício na produção de cana de açúcar.** SECAPI200 - V Seminário de cana-de-açúcar de Piracicaba. Piracicaba. Julho/2000.

MEDINA-GONZALES, O. A., R. L. FOX,; R. P.BOSSHART. 1988. **Solubility and availability to sugarcane (*Saccharum spp.*) of two silicate materials.** Fert. Res. 16:3-13.

OKUDA, A.; E. TAKAHASHI, 1964. **The role of silicon: in The mineral nutrition of the rice plant, Proc., Symp. Intern. Rice Res. Inst., Feb., 1964.,** John Hopkins Press, Baltimore, MD, pp.123-146.

SNYDER, G. H., 1991. **Development of a silicon soil test for Histosol-grown rice.** Belle Glade EREC Research report EV-1991-2, Univ. of Florida, Belle Glade, FL.

SNYDER, G. H. , D. B. JONES,; G. J. GASCHO. 1986. **Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols.** Solo Sci. Soc. Am. J. 50:1259-1263.

RAIJ, B.VAN; CAMARGO, O. A. **Silica solúvel em solos. *Baragantia.*** v. 32, p. 223-236, 1973.

