

# POTENCIAL DE USO DE AGREGADOS SIDERÚRGICOS E OUTRAS FONTES DE SILÍCIO EM QUATRO MATERIAIS DE SOLO FASE CERRADO

## POTENTIAL OF USE OF SLAGS AND OTHER SILICON SOURCES IN FOUR MATERIALS OF THE SAVANNA SOILS

Hamilton Seron PEREIRA<sup>1</sup>; Angélica Araújo QUEIROZ<sup>2</sup>; Meiry Roberta MARTINS<sup>3</sup>; Mônica Sartori de CAMARGO<sup>4</sup>; Gaspar Henrique KORNDÖRFER<sup>5</sup>

1. Professor, Universidade Federal de Goiás. [hseron@uol.com.br](mailto:hseron@uol.com.br); 2. Mestranda em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia; 3. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia; 4. Pesquisadora, Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios; Professor, Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia.

**RESUMO:** Para suprir a demanda por fertilizantes silicatados, há necessidade de investigar e identificar as fontes potenciais de silício (Si) disponível. O objetivo foi avaliar materiais (fertilizantes/agregados siderúrgicos) com alta concentração em Si, através de métodos químicos de incubação de solo, para prever a sua eficiência agrônômica e reatividade no solo. Foram feitos estudos de incubação (com e sem balanceamento com  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ ) durante 90 dias, utilizando 4 materiais de solo sob vegetação de cerrado (Latossolo Vermelho distrófico - LVd, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico - LVAd, Latossolo Vermelho distroférrico - LVdf e Neossolo Quartzarênico órtico - RQo) com 12 fontes de Si (wollastonita, escória de alto forno I e II, escória de aço forno LD I, II, III e IV, escória de P, escória de aço forno AOD, escória de aço forno elétrico, escória de aço inox e argila silicatada) e testemunha. A wollastonita foi usada com doses de 125, 250 e 500  $\text{kg ha}^{-1}$  e os demais materiais na dose de 125  $\text{kg ha}^{-1}$ . Os teores de silício em ácido acético foram maiores que os extraído com água, superestimando o conteúdo de Si nas fontes quando foi usado os carbonatos de Ca e Mg. Os agregados siderúrgicos originados de alto forno, os quais possuem maior teor de Si, são mais solúveis em ácido acético e menos solúveis em água, em relação aos demais materiais. A escória de forno elétrico apresentou os maiores teores de silício extraído em água, forma mais solúvel, apresentando maior potencial de utilização para agricultura, embora sejam necessários estudos com plantas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Escória. Silicatos. Solubilidade. Cálcio. Magnésio.

### INTRODUÇÃO

Solos tropicais podem conter, em alguns casos, teores menores que 2  $\text{mg kg}^{-1}$  Si no extrato saturado devido ao seu alto grau de intemperismo (FOX et al, 1967), como é o caso de várias classes de solos da região central do cerrado brasileiro. Aliado a isso, cultivos consecutivos de plantas acumuladoras de Si, como gramíneas, tendem a reduzir os teores de Si “disponível” no solo. Tais solos podem apresentar de 5 a 10 vezes menos Si “disponível” que nas regiões temperadas (Mc KEAGUE; CLINE, 1963; FOY, 1992).

O silício é um elemento benéfico para a produção de várias culturas como arroz, cana-de-açúcar (OKUDA; TAKAHASHI, 1964; AYRES, 1966; HALAIS, 1968; GASCHO; ANDREIS, 1974; GASCHO, 1978; SNYDER et al., 1986; ANDERSON et al. 1987). Sua utilização no País tem sido difundida nos últimos anos, principalmente após sua inclusão na legislação de fertilizantes e corretivos do Ministério da Agricultura (BRASIL, 2004), embora isso já ocorra há mais de quarenta anos como corretivo de

acidez nas Américas e Europa e como fertilizante silicatado no Japão, Coréia, China e Hawai.

As principais características de uma fonte de Si para fins de uso na agricultura são alto conteúdo de Si “disponível”, boas propriedades físicas, pronta disponibilidade às plantas e baixo custo. Os resíduos de plantas (casca de arroz e bagaço de cana) são fontes de Si, mas possuem liberação lenta. Estes são de uso mais nobre na geração de vapor e são insuficientes para atender demanda. Por outro lado, os agregados siderúrgicos são as fontes mais abundantes e “baratas” de silicatos, além do seu uso poder reduzir esse passivo ambiental, uma vez que o Brasil é um dos grandes produtores mundiais de ferro-gusa, produzindo 6,25 milhões de toneladas anuais (KORNDÖRFER et al., 2002). Em países como o Japão, praticamente todo agregado siderúrgico é reciclado, sendo parte dele usado como fertilizante (TAKAHASHI et al., 1990). Aliado a isso, as altas temperaturas utilizadas nos processos siderúrgicos liberam o Si de estados mais cristalinos até formas mais reativas e solúveis.

A importância do silício para algumas espécies de plantas vem sendo demonstrada e níveis críticos para o solo e planta estão sendo estabelecidos no Brasil. Para suprir a demanda por fertilizantes silicatados, há necessidade de investigar e identificar as fontes potenciais de Si disponível. O objetivo desse trabalho foi avaliar materiais (fertilizantes/agregados siderúrgicos) com alta concentração em Si, através de métodos químicos de incubação de solo, para prever a eficiência agrônômica do material e a sua reatividade no solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

A escolha dos agregados siderúrgicos foi feita em função da sua composição química, teor de silício total e potencial de uso na agricultura. A Wollastonita, produto com alto grau de pureza química e rico em  $\text{CaSiO}_3$ , foi incluída como padrão de comparação entre as fontes, conforme é feito nos estudos de silício. Os materiais foram caracterizados quanto à sua origem, poder de neutralização (PN), Si total, Ca e Mg (Tabela 1).

**Tabela 1.** Caracterização dos materiais utilizados no experimento.

Material	Origem	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	PN	PN
		Total	g kg <sup>-1</sup>			Calculado
		----- %CaCO <sub>3</sub> -----				
Wollastonita	Vanzil	502,7	424,3	1,9	76,4	73,5
Escória de alto forno I	Silifétil	383,7	301,4	75,2	72,6	70,0
Escória de alto forno II	CSN	333,8	425,3	52,3	89,1	87,5
Escória de aço forno LD I	Silifétil	122,8	409,4	72,7	91,3	90,5
Escória de aço forno LD II	CSN	109,1	281,9	76,1	69,3	96,0
Escória de aço forno LD III	Belgo Mineira	173,8	395,2	95,5	94,4	102,5
Escória de aço forno LD IV	Açominas	111,9	276,3	28,5	56,5	91,5
Escória de P elementar	Rhodia	461,1	435,0	6,8	79,6	63,0
Argila silicatada	MIBASA	428,4	70,1	107,8	39,3	33,0
Escória de aço forno AOD	Acesita	100,9	564,2	57,8	115,3	118,5
Escória de aço forno elétrico	Belgo (Siderme)	158,3	257,3	125,7	77,2	95,0
Escória de aço inox	Recmix	232,2	367,0	94,3	89,1	87,5

Para determinar a reatividade e eficiência agrônômica dos materiais, foram feitos dois estudos de incubação (com e sem balanço de Ca e Mg) em quatro materiais de solos característicos da região central do Brasil, coletados à profundidade de 0 a 20 cm, sob vegetação original de cerrado. Os solos amostrados (Tabela 2) pertencem às classes Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Neossolo Quartzarênico órtico (RQo).

Os estudos de incubação foram conduzidos, segundo metodologia descrita por Medina-Gonzales et al. (1988) em casa-de-vegetação do ICIAG/UFU. Os tratamentos foram dispostos em delineamento inteiramente casualizado num esquema fatorial consistindo de 12 fontes mais a testemunha e quatro materiais de solo, mais duas doses adicionais de wollastonita (Tabela 3). Os materiais foram homogeneizados em potes plásticos (250 g), fechados e mantidos próximos à capacidade de campo, com água destilada, durante 90 dias.

**Tabela 2.** Características dos materiais de solo usados nos experimentos.

Solos	pH <sub>CaCl2</sub>	P*	Si**	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC <sub>ef</sub>	CTC	V	m	M.O.
		---mg dm <sup>-3</sup> ---	-----	-----	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	-----	-----	-----	---- % ----	-----	g kg <sup>-1</sup>
LVdf	5,0	16	18,5	0,5	3,8	1,6	5,8	6,3	11,8	49	8	41
LVd	4,4	2	16,6	0,7	0,2	0,0	0,3	1,0	7,3	4	73	40
LVAd	5,0	4	35,7	0,7	0,2	0,0	0,3	1,0	7,7	4	70	45
RQo	4,4	56	3,3	1,0	0,2	0,1	0,4	1,4	5,2	7	71	15

\* Fósforo extraído por Mehlich 1 ( $\text{HCl}$  0,05 mol dm<sup>-3</sup> +  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 mol dm<sup>-3</sup>); \*\* Silício extraído com ácido acético

**Tabela 3.** Tratamentos aplicados nos experimentos

Agregado	Teor Si	Dose Si	Dose Produto	Dose* Ca	Dose* Mg	Dose** CaCO <sub>3</sub>	Dose*** MgCO <sub>3</sub>
Siderúrgico	g kg <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>					
Testemunha	-	-	-	0	0	2531	456
Wollastonita	234,6	125	533	162	1	2149	454
Wollastonita	234,6	250	1066	323	1	1767	452
Wollastonita	234,6	500	2131	646	2	1003	447
Escória de alto forno I	179,1	125	698	150	31	2176	343
Escória de alto forno II	155,8	125	802	244	25	1955	366
Escória de aço forno LD I	57,3	125	2182	638	95	1022	116
Escória de aço forno LD II	50,9	125	2455	494	112	1362	55
Escória de aço forno LD III	81,1	125	1541	435	88	1502	141
Escória de aço forno LD IV	52,2	125	2394	472	41	1414	310
Escória de P elementar	215,2	125	581	181	2	2104	447
Argila silicatada	200,0	125	625	31	40	2457	311
Escória de aço forno AOD	47,1	125	2655	1070	92	0	127
Escória de aço forno elétrico	73,9	125	1692	311	128	1796	0
Escória de aço inox	108,4	125	1154	302	65	1816	223

\* Dose de Ca e Mg fornecido pelos produtos; \*\* Dose de CaCO<sub>3</sub> para igualar os teores de Ca aplicado no experimento 1 (com balanço de Ca); \*\*\* Dose de MgCO<sub>3</sub> para igualar os teores de Mg aplicado no experimento 1 (com balanço de Mg)

Após esse período, o material de solo de cada pote foi coletado e seco ao ar para a realização das análises de Ca e Mg (extração com KCl), pHCaCl<sub>2</sub> (CFSEMG, 1999), Si solúvel em ácido acético (0,5 mol L<sup>-1</sup>) e em água, conforme Korndörfer et al. (1999). Dez gramas de material de solo foram agitados por 1 hora com 100 mL dessas soluções. Após agitação, esperou-se decantar por 15 minutos, filtrou-se a solução, deixando-a em repouso por mais de 12 horas. A determinação do Si no sobrenadante, para cada uma das soluções extratoras, foi feita no espectrofotômetro ajustado no comprimento de onda 660 nm.

A análise estatística das variáveis analisadas foi realizada, fazendo-se regressões para as doses de wollastonita e teste Tukey entre os demais tratamentos, nas doses de 125 kg ha<sup>-1</sup> de Si e testemunha, com o auxílio do programa SAS (Statistical Analysis System).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

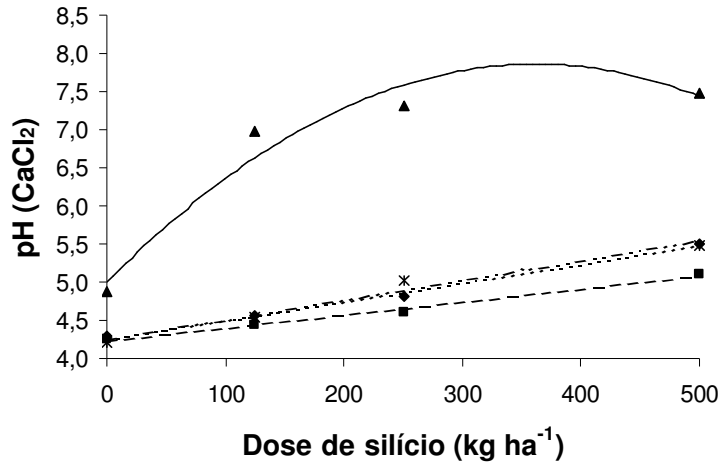
Não houve variação significativa nos valores de pHCaCl<sub>2</sub> no experimento 1 (com balanço de Ca e Mg) em função das doses de wollastonita. Para LVdf, LVd, LVAd e RQo, os valores médios foram de 6,5; 6,8; 6,4 e 7,9, respectivamente. Ao contrário, no experimento 2 (sem balanço de Ca e Mg), houve aumento

significativos e lineares de pH com as doses de wollastonita, exceto no RQo, onde o comportamento foi quadrático (Figura 1), devido ao seu baixo poder tampão. Nos dois experimentos, pode-se observar que o poder de correção dos silicatos de cálcio e magnésio foi semelhante ao dos carbonatos de cálcio e magnésio, conforme demonstrado por Alcarde (1992). Esses resultados concordam com Camargo et al. (2005b) e Chagas (2004), que utilizaram a wollastonita em solos com características semelhantes.

Quanto aos outros materiais, houve diferença pouco acentuada entre eles no experimento 1. A testemunha apresentou maior correção de pH devido a mais rápida reação dos carbonatos de cálcio e magnésio em relação às fontes de Si (Tabela 4). Os carbonatos (Ca e Mg) usados foram de alta pureza química e granulometria fina, favorecendo a sua reatividade. O agregado de escória de LD II, escória LD I, alto forno II, escória de AOD e escória LD III diferiram do tratamento testemunha na média entre os materiais de solo (Tabela 4). Dentre essas fontes, o agregado da escória de AOD não recebeu carbonato de Ca, por ser a fonte com a maior quantidade desse nutriente. Isso mostra que o carbonato usado na testemunha foi aquele mais reativo, semelhante aos resultados obtidos por Gama et al. (2002).

Quanto às fontes que foram utilizadas nos experimentos, em função da sua composição em Si, no experimento sem o balanceamento com carbonatos, o agregado da escória de AOD apresentou maior correção do pH (Tabela 4), explicado pelo alto poder de neutralização (Tabela

1) e a dose mais alta utilizada devido o baixo teor de Si em sua composição. Quanto menor o poder tampão do solo, como no RQo, com alto teor de areia e baixo teor de óxidos e matéria orgânica, as variações de pH foram maiores (Tabela 4).



---■---	LVAAd	$Y = 4,22 + 0,002X^{**}$	$R^2 = 0,99$
—▲—	RQo	$Y = 5,0 + 0,016X - 0,00002X^2^{**}$	$R^2 = 0,95$
.....◆.....	LVdf	$Y = 4,25 + 0,002X^{**}$	$R^2 = 0,99$
- - - * - - -	LVd	$Y = 4,25 + 0,003X^{**}$	$R^2 = 0,97$

**Figura 1.** Efeito das doses de silicato (wollastonita) sobre o pH de 4 diferentes materiais de solo (com e sem balaço de Ca e Mg).

Quanto ao Si, a aplicação da wollastonita promoveu aumentos lineares nos teores de Si extraídos em ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup> (Figura 2) e em água (Figura 3) nos experimentos com e sem balanceamento de carbonatos. Os teores de silício

extraído com ácido acético foram sempre maiores que aqueles extraídos em água, conforme esperado, devido ao alto poder de extração, já demonstrado em outros trabalhos (CAMARGO et al., 2005a; DALTO, 2003).

**Tabela 4.** Resultados do pH (H<sub>2</sub>O) nos materiais de solo incubados com fontes de Si com e sem balanceamento de Ca e Mg.

	Materiais de solos (0-20 cm prof.) com balanceamento de carbonatos										Materiais de solos (0-20 cm prof.) sem balanceamento de carbonatos									
	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média
	pH (CaCl <sub>2</sub> )																			
Testemunha	6,5	a	7,9	a	6,5	a	6,9	a	7,0	a	4,3	d	4,9	g	4,3	d	4,2	h	4,4	i
Wollastonita	6,4	ab	7,9	a	6,5	a	6,7	ab	6,9	ac	4,4	d	7,0	c	4,6	cd	4,6	fg	5,1	f
Alto forno I	6,3	ab	7,9	a	6,5	ab	6,7	ab	6,9	ac	4,4	d	6,4	d	4,5	cd	4,5	fg	5,0	fg
Alto forno II	6,1	ab	7,8	a	6,2	ab	6,5	ab	6,7	cd	4,4	d	5,3	f	4,4	cd	4,4	fh	4,6	hi
Escória de LD I	6,3	ab	7,7	a	6,2	ab	6,4	ab	6,6	cd	5,4	b	7,7	b	5,6	ab	5,8	c	6,1	bd
Escória de LD II	6,0	b	7,7	a	6,1	b	6,3	b	6,5	d	5,5	b	7,7	b	5,6	ab	5,5	d	6,1	cd
Escória de LD III	6,2	ab	7,8	a	6,3	ab	6,5	ab	6,7	bd	5,1	bc	7,8	ab	5,5	ab	5,3	de	5,9	d
Escória de LD IV	6,3	ab	7,8	a	6,4	ab	6,6	ab	6,8	ad	5,6	b	7,8	ab	5,9	ab	5,8	c	6,3	bc
Agregado de P	6,4	ab	7,8	a	6,4	ab	6,7	ab	6,8	ac	4,4	d	6,9	c	4,6	cd	4,6	f	5,1	f
Argila silicatada	6,4	ab	7,9	a	6,5	ab	6,8	ab	6,9	ab	4,3	d	6,0	e	4,4	d	4,3	gh	4,8	gh
Escória de AOD	6,1	ab	7,7	a	6,3	ab	6,6	ab	6,7	bd	6,3	a	7,8	ab	6,1	a	6,5	a	6,7	a
Escória forno elétrico	6,3	ab	7,9	a	6,5	ab	6,6	ab	6,8	ac	5,5	b	8,0	a	5,9	ab	6,1	b	6,4	b
Escória de aço inox	6,4	ab	7,9	a	6,5	ab	6,7	ab	6,9	ac	4,7	cd	7,7	b	5,2	bc	5,1	e	5,7	e
C.V. (%)	2,4		3,3		2,7		3,4		3,1		4,4		1,2		5,9		1,9		3,6	
Valor de F	3,4	**	0,5	ns	3,1	**	2,1	*	5,8	**	37,4	**	586,6	**	19,8	**	247,6	**	230,6	**
D.M.S. 5%	0,38		0,7		0,42		0,56		0,25		0,54		0,22		0,76		0,24		0,23	

- F significativo a 5%; \*\* F significativo a 1%

-

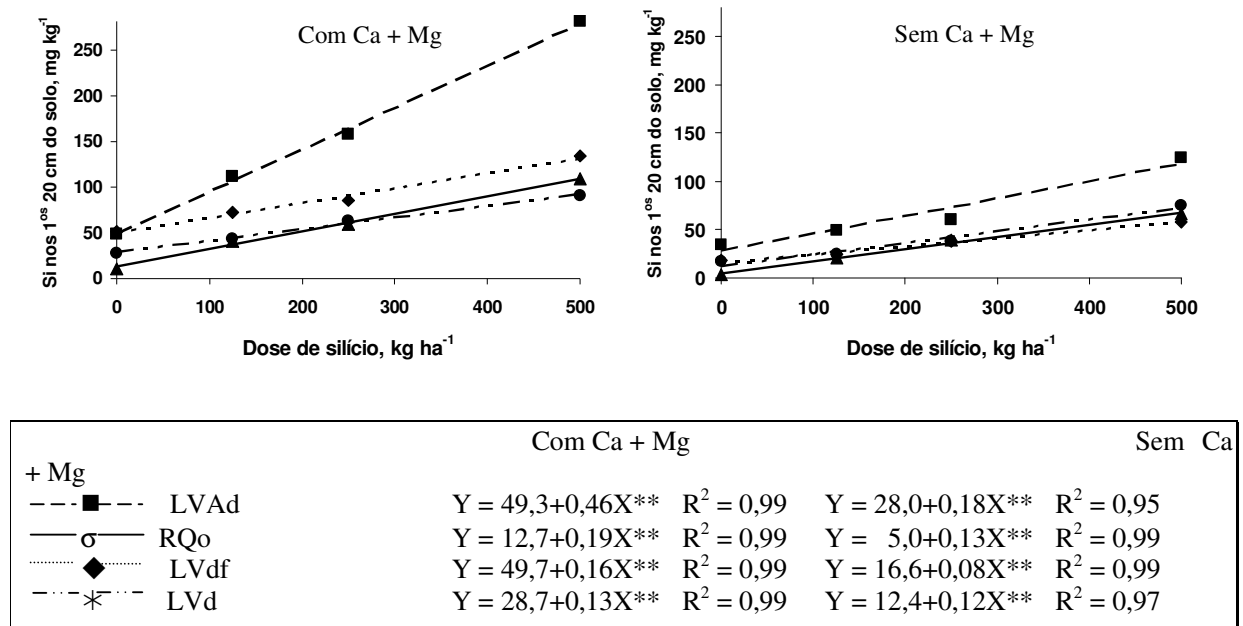


Figura 2. Regressões entre o Si extraído com ácido acético nos primeiros 20 cm do solo e o Si fornecido pelas doses de wollastonita.

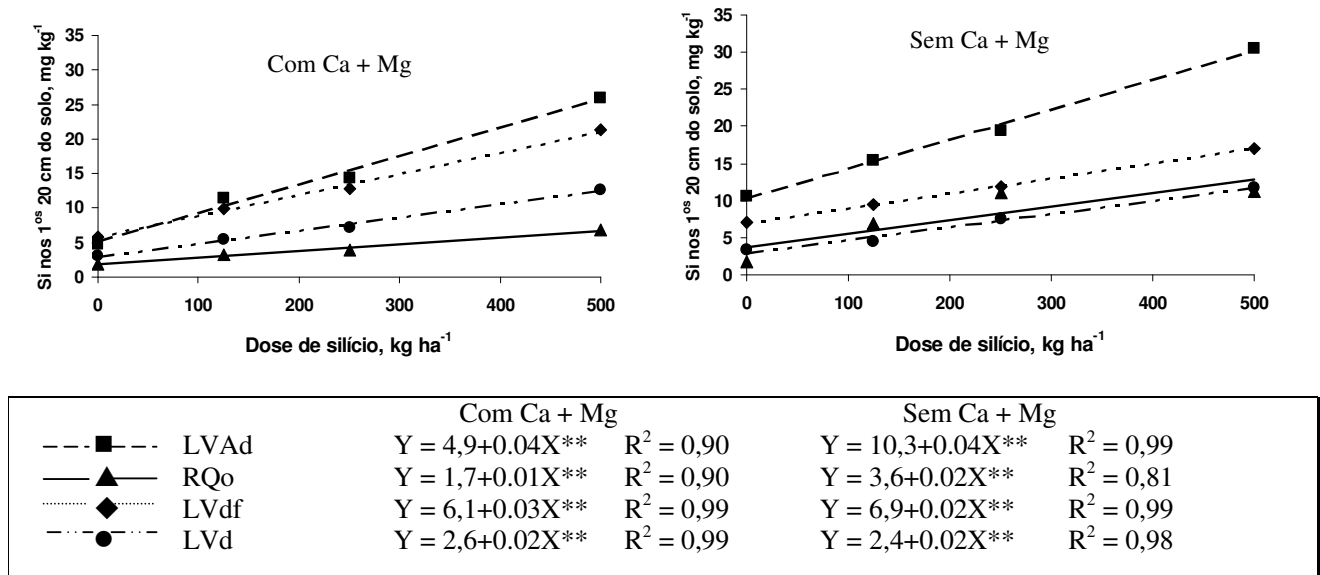


Figura 3. Regressões entre o Si extraído com água nos primeiros 20 cm do solo e o Si fornecido pelas doses de wollastonita.

No experimento 1 (com uso de carbonatos), os teores de silício em ácido acético foram superiores (Figura 2) àqueles do experimento 2 (sem carbonatos). À medida que as doses de wollastonita aumenta, as diferenças entre ambos foram acentuadas (Figuras 2). No RQo, do experimento 1, onde a correção da acidez foi mais acentuada devido ao menor poder tampão em relação aos demais solos, houve maior inclinação da reta do Si extraído com ácido acético (Figura 2). A elevação do pH faz o extrator ácido acético liberar maior quantidade de Si adsorvido nos colóides, assim como, solubilizar polissilicatos que são consideradas formas não disponível para as plantas, conforme sugerido por Berthelsen et al. (2002). Este mesmo efeito verificado no RQo também explica as diferenças de valores no teor de Si entre os dois experimentos nos quatro materiais de solo, que são maiores no experimento 1 que recebeu carbonatos de Ca e Mg. Resultados semelhantes foram obtidos por Camargo et al. (2005a), que estudaram a solubilidade do silício em solos, utilizando ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup> e água. Xu et al. (2001) também mostraram a problemática dos extratores ácidos em solos calcáreos.

Por outro lado, os valores de silício solúvel em água foram mais baixos que em ácido acético (Figuras 2 e 3), sugerindo que não são influenciados pelo pH do solo e pelas fontes. Os teores de Si em água nos experimentos com ou sem balanceamento de carbonatos foram próximos, ocorrendo aumentos com as doses de wollastonita (Figura 3).

Na comparação entre as fontes, a escória de alto forno II apresentou maior teor médio de Si extraído pelo ácido acético, diferindo das demais fontes, exceto da escória de AOD no experimento sem balanço de Ca e Mg (Tabela 5). Isso ocorreu devido ao maior aumento de pH deste tratamento no experimento 2 e ao efeito do pH na extração de Si pelo ácido acético. Nos tratamentos da escória de AOD, os teores de Si foram próximos em ambos os experimentos, porque no experimento com balanceamento a fonte AOD recebeu apenas o MgCO<sub>3</sub>, cuja dose pouco influenciou os resultados quando comparado os dois experimentos. Novamente, houve maior teor de Si extraído com ácido acético no experimento com balanço de Ca e Mg devido a maior elevação do pH nesses tratamentos em função da aplicação de carbonatos de Ca e Mg (Tabela 4). Ao avaliar as fontes, verifica-se que, com o ácido acético, é difícil isolar

o Si liberado pelo aumento do pH e o Si realmente liberado pela fonte, devido à variação nas doses de cada fonte (Tabela 3) e seu PN (Tabela 1).

Com relação à maior liberação de Si das fontes pelo ácido acético, a hipótese mais provável para este fato é a alteração no equilíbrio entre as formas dos silicatos do solo que, em pH mais elevado, são solubilizados pelo ácido acético. Por outro lado, a hipótese das fontes ter maior solubilização em pH mais elevado também não pode ser descartada. Mesmo assim, a fonte que menos liberou Si foi a argila silicatada (Tabela 5).

Um outro problema observado foi o Si solubilizado da própria fonte pelo ácido acético. Pereira et al. (2004) demonstraram que os agregados de alto forno não são tão eficientes no fornecimento de Si às plantas, mas apresentam alta concentração desse elemento e solubilidade em ácidos fracos. Isso pode ser observado com as escórias de alto forno, trazendo, novamente, a problemática sobre métodos de análise de solo que devem ser testados.

Ao contrário do ácido acético, a extração com água determinou a quantidade de silício presente no solo, possivelmente, disponível na solução do solo. No experimento com balanceamento de Ca e Mg, como era de se esperar, a testemunha foi aquela com menor quantidade de silício na média e nos quatro materiais de solo, seguido dos tratamentos alto forno I, argila silicatada, escória LD IV e alto forno II. As fontes que apresentaram maior teor de silício extraível em água foram escória de forno elétrico, escória de AOD, escória de aço inox e escória LD I (Tabela 6) que não diferiram entre si.

No experimento sem balanceamento de Ca e Mg, a escória de forno elétrico foi o tratamento que apresentou maior teor de silício em água seguido da escória de AOD e escória LD I. Na média dos quatro materiais de solo, os teores de Si encontrado no experimento sem Ca e Mg, são mais altos do que no experimento com balanceamento de Ca e Mg (Tabela 6) indicando que este extrator (água) não sofre tanta influência do pH na extração de Si. Assim, as fontes de origem de alto forno, como alto forno I e II, apesar de terem altos teores de Si, não liberaram tanto este elemento por este extrator, em comparação ao ácido acético. Assim como no experimento com balanceamento de Ca e Mg, neste experimento a testemunha apresentou a menor liberação de Si, não diferindo da argila silicatada.

**Tabela 5.** Resultados de silício em ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup> nos materiais de solo incubados com fontes de Si, com e sem balanceamento de Ca e Mg.

Tratamentos	Materiais de solo (0-20 cm de prof.) com balanceamento de carbonatos					Materiais de solo (0-20 cm de prof.) sem balanceamento de carbonatos														
	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média										
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----																			
Testemunha	49	c	11	f	51	d	28	cd	35	d	35	f	3	e	18	e	17	e	18	g
Wollastonita	111	ac	40	df	72	b	44	bd	67	c	49	ef	21	de	25	de	24	de	30	f
Alto forno I	137	a	70	bd	71	bd	60	ab	85	bc	64	de	40	bd	40	ac	37	cd	45	e
Alto forno II	172	a	142	a	93	a	81	a	122	a	128	a	68	a	39	ac	64	ab	75	a
Escória de LD I	117	ab	78	bd	82	ab	45	bd	81	bc	76	cd	52	ab	36	bd	47	ac	53	de
Escória de LD II	139	a	81	bc	73	ab	44	bd	84	bc	112	ab	56	ab	46	ab	45	bc	65	bc
Escória de LD III	137	a	102	ab	73	ab	64	ab	94	b	78	cd	58	ab	42	ab	44	c	56	cd
Escória de LD IV	111	ac	52	ce	67	bd	44	bd	68	c	92	bc	45	ac	42	ab	46	ac	56	cd
Agregado de P	129	a	81	bc	69	bd	42	bd	80	bc	50	ef	25	ce	27	ce	23	de	31	f
Argila silicatada	52	bc	16	ef	52	cd	26	d	36	d	46	ef	5	e	19	e	18	e	22	fg
Escória de AOD	113	ac	80	bd	72	bc	43	bd	77	bc	121	a	57	ab	50	a	65	a	73	ab
Escória de forno elétrico	107	ac	78	bd	72	b	44	bd	75	bc	85	c	52	ab	46	ab	55	ac	59	cd
Escória de aço inox	119	ab	81	bc	77	ab	50	bc	82	bc	118	a	52	ab	35	bd	38	cd	61	cd
C.V. (%)	24		23		11		20		22		10		23		15		19		16	
Valor de F	6	**	18	**	8	**	10	**	28	**	57	**	19	**	16	**	18	**	91	**
D.M.S. 5%	68		41		20		23		20		21		24		13		19		9,3	

\* F significativo a 5%; \*\* F significativo a 1%



**Tabela 6.** Resultados de silício em água nos materiais de solo incubados com fontes de Si, com e sem balanceamento de Ca e Mg.

Tratamentos	Materiais de solo (0-20 cm de prof.) com balanceamento de carbonatos									Materiais de solo (0-20 cm de prof.) sem balanceamento de carbonatos										
	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média					
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----																			
Testemunha	4,7	e	1,8	c	5,8	g	3,0	b	3,8	f	10,6	ef	1,7	d	7,0	d	3,3	cd	5,6	g
Wollastonita	11,4	c	3,2	ac	9,9	ab	5,4	ab	7,5	cd	15,4	ac	6,9	bc	9,5	ac	4,5	bd	9,1	cd
Alto forno I	11,4	c	1,8	c	7,7	df	4,4	b	6,3	e	14,3	bd	3,9	cd	9,2	ac	4,4	bd	7,9	ef
Alto forno II	12,4	c	2,2	c	6,6	fg	4,4	b	6,4	de	12,7	de	3,0	d	7,6	cd	4,7	bd	7,0	f
Escória de LD I	15,3	a	4,7	ac	9,0	bd	5,6	ab	8,6	ab	17,0	a	9,1	ab	9,1	ac	6,1	ab	10,3	ab
Escória de LD II	15,4	a	4,1	ac	7,5	ef	4,9	ab	8,0	bc	13,7	cd	9,5	ab	9,8	ab	5,3	bc	9,6	bd
Escória de LD III	14,6	ab	4,2	ac	8,2	ce	5,9	ab	8,2	bc	14,7	bd	8,1	ab	8,8	ad	5,3	bc	9,2	cd
Escória de LD IV	7,1	d	2,4	bc	8,9	bd	5,6	ab	6,0	e	14,6	bd	7,1	b	8,9	ad	4,3	bd	8,7	de
Agregado de P	13,8	b	4,5	ac	8,9	bd	5,1	ab	8,1	bc	14,0	cd	6,8	bc	9,3	ac	4,3	bd	8,4	de
Argila silicatada	12,2	c	2,9	ac	6,7	fg	3,3	b	6,3	e	10,2	f	2,0	d	7,9	bd	2,9	d	5,7	g
Escória de AOD	15,4	a	5,8	a	9,1	bc	5,8	ab	9,0	ab	14,9	ad	9,3	ab	8,9	ad	7,4	a	10,1	ac
Escória de forno elétrico	13,8	b	5,8	a	11,2	a	7,2	a	9,5	a	16,4	ab	10,5	a	10,8	a	5,1	bc	10,7	a
Escória de aço inox	14,9	ab	3,9	ab	9,3	bc	5,4	ab	8,7	ab	14,4	bd	8,5	ab	9,3	ac	6,0	ab	9,5	bd
C.V. (%)	4,3		34,7		6,4		21,7		12,57		6,4		18,3		9,1		17,4		11,1	
Valor de F	152,0	**	5,1	**	30,8	**	3,8	**	45,47	**	19,0	**	24,5	**	5,7	**	7,8	**	46,3	**
D.M.S. 5%	1,3		3,2		1,3		2,7		1,11		2,2		3,0		2,0		2,1		1,1	

\* F significativo a 5%; \*\* F significativo a 1%

As doses de wollastonita não promoveram aumento nos teores de Ca no experimento onde esse elemento foi balanceado, conforme ocorreu para os valores de pH. Porém no experimento sem o balanceamento com Ca houve aumento linear em

todos os materiais de solo, sendo a maior elevação constatada no LVdf e a menor no RQo. Novamente, o poder tampão desses materiais de solo influenciou no comportamento dos carbonatos e das fontes de Si na elevação do Ca (Figura 4).

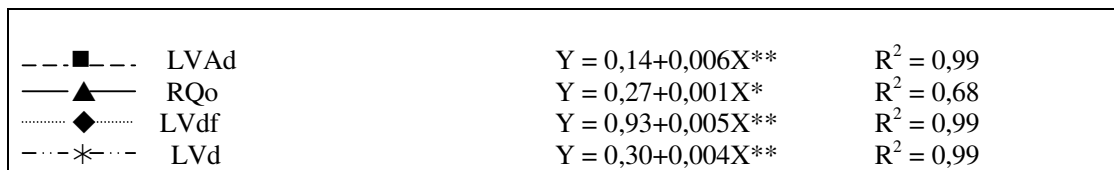
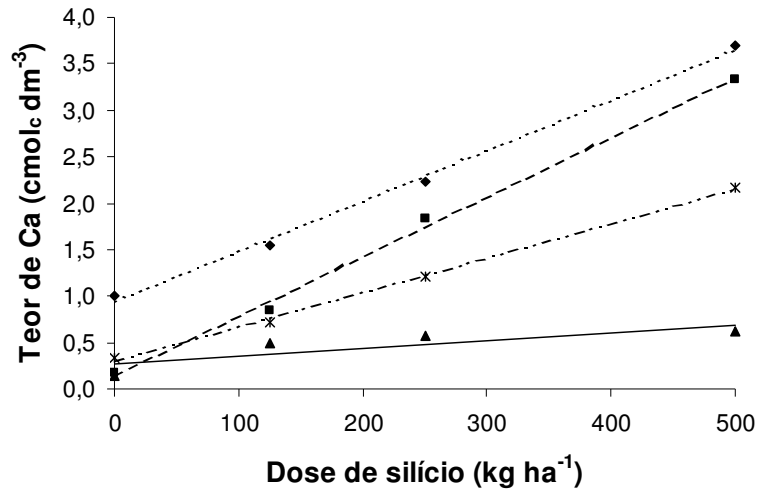


Figura 4. Doses de Si aplicada e o efeito sobre os teores de Ca nos materiais de solo (0-20 cm de prof.).

Quanto às fontes, o agregado de escória de LD II liberou menor quantidade de Ca no experimento 1 (com o balanço de carbonatos), diferindo da testemunha e seguido pela escória de alto forno II, escória de LD III, escória de aço inox e escória LD IV. Quando não houve o balanceamento de Ca e Mg, a fonte com maior liberação média de Ca foi a escória de AOD, seguida pela escória LD IV, escória LD I e escória de LD II, as quais foram, também, as fontes com as maiores doses de Ca (Tabela 7).

O Mg não apresentou variações significativas com as doses da wollastonita, devido à sua baixa concentração na composição desta fonte de Si (Tabela 1). Entre as fontes, houve grandes variações mesmo no experimento com uso

de carbonatos. Na média dos quatro materiais de solo, as fontes com maior liberação de Mg foram também aquelas com maiores doses de carbonatos: wollastonita, a testemunha, a alto forno I e o agregado de P (Tabela 1). Aliado a isso, as escórias LD II, escória de AOD e escória LD I liberaram menor quantidade de Mg, pois foram os tratamentos com menor quantidades de carbonato de Mg. Isso indica menor liberação de Mg das fontes em comparação ao carbonato cuja eficiência demonstra ser menor. A escória de forno elétrico, que não recebeu carbonato de magnésio, apresentou liberação bastante elevada nos dois experimentos, demonstrando que essa fonte apresenta esse elemento numa forma mais solúvel (Tabela 8).

**Tabela 7.** Resultados de cálcio trocável nos materiais de solo incubados com fontes de Si, com e sem balanceamento de Ca e Mg.

Tratamentos	Materiais de solo (0-20 cm de prof.) com balanceamento de carbonatos										Materiais de solo (0-20 cm de prof.) sem balanceamento de carbonatos									
	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média					
	----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----																			
Testemunha	3,9	a	2,3	ad	4,0	ab	3,6	a	3,4	ab	0,2	f	0,1	g	1,0	g	0,3	h	0,4	h
Wollastonita	3,7	ab	2,1	cf	4,0	a	3,5	a	3,3	ac	0,8	ef	0,5	e	1,6	fg	0,7	ef	0,9	fg
Alto forno I	3,2	ab	2,1	cf	3,9	ab	3,4	a	3,2	ad	0,7	f	0,3	f	1,6	eg	0,6	eg	0,8	fg
Alto forno II	3,0	ab	2,2	be	3,1	bc	2,9	a	2,8	de	0,7	f	0,2	fg	1,4	fg	0,5	fh	0,7	gh
Escória de LD I	3,3	ab	2,7	ab	3,4	ac	3,0	a	3,1	ae	2,5	bc	1,0	b	3,1	bc	2,0	b	2,2	bc
Escória de LD II	2,8	b	1,7	f	2,9	c	3,4	a	2,7	e	2,7	bc	0,8	c	3,1	bc	1,6	c	2,0	cd
Escória de LD III	3,1	ab	1,8	ef	3,5	ac	3,6	a	3,0	ce	2,2	bc	0,8	c	3,2	bc	1,4	cd	1,9	ce
Escória de LD IV	3,2	ab	2,3	be	3,3	ac	3,4	a	3,0	be	3,1	b	1,1	ab	3,7	b	2,1	b	2,5	b
Agregado de P	3,4	ab	2,2	be	3,4	ac	3,7	a	3,2	ad	1,1	df	0,5	e	2,0	df	0,8	e	1,1	f
Argila silicatada	3,4	ab	2,5	ac	3,7	ac	3,6	a	3,3	ac	0,3	f	0,2	fg	1,4	fg	0,4	gh	0,6	gh
Escória de AOD	3,1	ab	2,1	cf	3,7	ac	3,8	a	3,1	ad	4,6	a	1,1	a	4,8	a	3,0	a	3,4	a
Escória de forno elétrico	3,6	ab	2,7	a	3,9	ab	3,7	a	3,5	a	2,1	bd	0,8	c	2,6	cd	1,5	c	1,7	de
Escória de aço inox	3,1	ab	1,8	df	3,5	ac	3,4	a	3,0	ce	1,9	ce	0,6	d	2,5	ce	1,1	d	1,5	e
C.V. (%)	11,7		8,9		10,1		11,7		11,1		25,8		6,9		14,7		9,6		19,6	
Valor de F	2,4	*	10,4	**	3,5	**	1,6	ns	172,6	**	32,2	**	256,8	**	35,8	**	179,3	**	136,5	**
D.M.S. 5%	1,0		0,5		0,9		1,0		0,41		1,1		0,1		0,9		0,3		0,35	

\* F significativo a 5%; \*\* F significativo a 1%

**Tabela 8.** Resultados de magnésio trocável nos materiais de solo incubados com fontes de Si, com e sem balanceamento de Ca e Mg.

Tratamentos	Materiais de solo (0-20 cm de prof.) com balanceamento de carbonatos										Materiais de solo (0-20 cm de prof.) sem balanceamento de carbonatos									
	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média	LVAd	RQo	LVdf	LVd	Média
	-----cmolc dm <sup>-3</sup> -----																			
Testemunha	0,77	a	0,34	de	3,34	ab	0,67	ab	1,28	ab	0,11	d	0,06	fg	0,51	e	0,08	df	0,19	de
Wollastonita	0,81	a	0,27	fg	3,45	a	0,71	a	1,31	a	0,13	d	0,06	fg	0,46	e	0,09	df	0,18	e
Alto forno I	0,71	ad	0,38	cd	3,28	ac	0,60	bc	1,24	ab	0,26	d	0,11	cd	0,72	cd	0,21	c	0,32	c
Alto forno II	0,76	ab	0,23	fg	2,86	de	0,68	a	1,13	cd	0,20	d	0,07	ef	0,58	ce	0,05	f	0,22	de
Escória de LD I	0,35	e	0,11	h	1,97	f	0,30	f	0,68	f	0,23	d	0,03	hi	0,64	ce	0,17	ce	0,26	ce
Escória de LD II	0,30	e	0,10	h	1,83	f	0,30	f	0,63	f	0,57	bc	0,14	b	0,99	b	0,34	b	0,51	b
Escória de LD III	0,62	d	0,41	bc	2,69	de	0,48	e	1,05	de	0,60	bc	0,09	de	1,09	b	0,13	cf	0,48	b
Escória de LD IV	0,62	cd	0,20	g	2,63	e	0,50	e	0,99	e	0,32	cd	0,05	gh	0,70	cd	0,20	cd	0,32	c
Agregado de P	0,77	a	0,27	ef	3,04	bd	0,73	a	1,20	ac	0,13	d	0,06	fg	0,55	de	0,05	ef	0,20	de
Argila silicatada	0,64	bd	0,22	fg	2,75	de	0,53	de	1,03	de	0,26	d	0,07	fg	0,73	cd	0,06	ef	0,28	cd
Escória de AOD	0,34	e	0,09	h	1,82	f	0,30	f	0,64	f	0,26	d	0,02	i	0,74	c	0,07	ef	0,27	cd
Escória de forno elétrico	0,71	ad	0,46	b	2,87	de	0,47	e	1,12	cd	1,40	a	0,24	a	2,01	a	1,32	a	1,24	a
Escória de aço inox	0,75	ac	0,54	a	2,90	ce	0,58	cd	1,19	bc	0,61	b	0,12	c	1,04	b	0,20	cd	0,49	b
C.V. (%)	8,47		9,91		5,95		5,63		8,44		29,96		11,22		8,78		21,02		19,06	
Valor de F	45,33	**	105,25	**	45,43	**	108,62	**	120,13	**	36,37	**	147,89	**	125,07	**	202,74	**	241,15	**
D.M.S. 5%	0,13		0,07		0,40		0,07		0,11		0,29		0,02		0,18		0,12		0,09	

\* F significativo a 5%; \*\* F significativo a 1%

## CONCLUSÕES

O ácido acético extrai mais silício no solo com a elevação do pH, após incubação.

A água extrai menos Si que o ácido acético, mas é um extrator mais confiável.

O ácido acético superestima o Si de certas fontes, principalmente as fontes de alto forno.

As fontes originadas de escórias de alto forno possuem alto teor de Si, porém, baixa disponibilidade em água.

A fonte originada de escória de forno elétrico se mostrou a de maior solubilidade para os elementos analisados.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa para a realização das pesquisas.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão de bolsa para a realização das pesquisas.

---

**ABSTRACT:** To supply the demand for silicates fertilizers, there is need to investigate and to identify the potential sources of silicon (Si) available. The objective went evaluate materials (fertilizers/slugs) with high concentration in Si, through chemical methods of soil incubation, to predict its agronomic efficiency and reatividade in the soil. They were made incubation studies (with and without balance with  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{MgCO}_3$ ) for 90 days, using 4 soil materials under savanna vegetation (Rhodorthox, Gibbsiorthox, Ferrorthox and Quartzipsamment soil) with 12 materials (Wollastonite, blast furnace I and II, steel slag of LD I, II, III and IV, slag of P, steel slag of AOD, electric furnace steel slag, stainless steel slag and silicate clay) and a control. Wollastonite was used with doses of 125, 250 and 500  $\text{kg ha}^{-1}$  and the other materials in the dose of 125  $\text{kg ha}^{-1}$ . The Si levels in acetic acid were larger than the extracted with water, overestimating the content of Si in the sources when the calcium and magnesium carbonate was used. The metallurgical aggregate originated of blast furnace, which possess larger Si level, they are more soluble in acetic acid and less soluble in water, in relationship the other slags. The electric furnace steel slag presented the level of Si extracted in water, it forms more soluble, showing high use potential for agriculture, although studies are necessary with plants.

**KEYWORDS:** Slags. Silicates. Solubility. Calcium. Magnesium.

---

## REFERENCIAS

ALCARDE, J. C. 1992. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: ANDA. 1992. (Boletim Técnico, 6).

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

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

BRASIL, decreto nº 2954. Aprova o regulamento da lei 6894 de 16 de janeiro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Normas Jurídicas** (Texto Integral) – DEC 004954, 14 jan., 2004, 27 p.

BERTHELSEN, S.; NOBLE, A.; KINGSTON, G.; HURNEY, A. & RUDD, A. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: **SILICON IN AGRICULTURE**

CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka, Japão. **Proceedings**. Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002, p. 57.

CAMARGO, M. S. de; KORNDÖRFER, G. H.; CORRÊA, G. F.; PEREIRA, H. S.; SCALIA, D.; RESENDE, R.H. Extratores de silício em solos: influência do calcário e fósforo. **Bioscience Journal**, v.21, p.9-19, 2005a.

CAMARGO, M. S. de; PEREIRA, H. S.; QUEIROZ, A. A.; REIS, C. B.; KORNDÖRFER, G. H. Disponibilidade de silício de diversos materiais para a cultura do arroz avaliada por diferentes extratores. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 30., 2005, Recife. **Cd Rom**, Recife: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005b.

CHAGAS, R. S. C. **Avaliação de fontes de silício para as culturas do arroz e milho**. 2004. 100f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (CFSEMG) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais 5ª aproximação**, Viçosa:CFSEMG, 1999. 359p.

DALTO, G. **Manejo de silicato e calcário em soja cultivada sobre palhada de cana-de-açúcar**. 2003. 90 p. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

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

FOX, R. L., J. A. SILVA, O. R. YOUNGE, D. L. PLUCKNETT,; G. D. SHERMAN. Soluble and total silicon in sugarcane. **Soil Science American Proceedings**, v. 31, p. 775-779, 1967.

GAMA, A. J. M.; PEREIRA, H. S.; KORNDORFER, G. H. Reatividade de subprodutos da indústria siderúrgica ricos em silicatos. In: VI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E II ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 2002, São José dos Campos. **Anais de Trabalhos Completos**. São Jose dos Campos: Univap, 2002. v. 1, p. 701-704.

GASCHO, G. J. Response of sugarcane to calcium silicate slag. I. Mechanisms of response in Florida. **Proceedings of Soil & Crop Science Society of Florida**, v. 37, p. 55-57, 1978.

GASCHO, G. J.; H. J. ANDRIES. Sugarcane response to calcium silicate slag applied to organic and areia soils. **Proceedings of International Society Sugar Cane Technology**, v. 15, p. 543-551, 1974.

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

KORNDORFER, G.H.; PEREIRA, H.S. & CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi – ICIAG-UFU, 2002. 23 p. (GPSi-ICIAG-UFU. Boletim Técnico, 01)

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista brasileira de ciência do solo**. Viçosa. v. 23, p. 101-106, 1999.

Mc KEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. **Advances in Agronomy**, v. 15, p. 339-397, 1963.

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

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

PEREIRA, H. S.; KORNDÖFER, G. H.; VIDAL, A. A.; CAMARGO, M. S. Silicon sources for the rice plants. **Scientia Agricola**, v. 61, p. 522-528, 2004.

SNYDER, G. H., D. B. JONES,; G. J. GASCHO. Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols. **Soil Science Society of America Journal** v. 50, p. 1259-1263, 1986.

TAKAHASHI, E.; MA, J.F.; MIYAKE, Y. The possibility of silicon as an essential element for higher plants. **Comments on Agricultural and Food Chemistry**, v.2, p. 99-122, 1990.

XU, G.; ZHAN, X.; CHUNHUA, L.; BAO, S.; LIU, X. & CHU, T. Assessing methods of available silicon in calcareous soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, p. 787-801, 2001.