

Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro

Alessandra Mayumi Tokura^{1*}, Antonio Eduardo Furtini Neto², Nilton Curi², Leandro Flávio Carneiro² e Alves Alexandre Alovizi³

¹Departamento de Agronomia, Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal, Av. Presidente Vargas, 1.775, 79825-090, Vila Progresso, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. ²Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Cx. Postal 3037, 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil. ³SNP Consultoria, Av. Antônio Emílio Figueiredo, 1758, sala 103, 79800-000, Dourados, Mato Grosso do Sul, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: mayumi@mail.uniderp.br

RESUMO. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes doses de Si e P na produção de matéria seca da parte aérea e de grãos e o acúmulo de Si e P na planta de arroz. Dois solos, RQo e LVdf, foram utilizados no estudo. Os tratamentos foram constituídos por quatro doses de P (0, 80, 240 e 410; 0, 110, 330 e 560 mg dm⁻³, respectivamente, para o RQo e LVdf) e três doses de Si (0, 240 e 410; 0, 330 e 560 mg dm⁻³, respectivamente, para o RQo e LVdf). O experimento foi realizado utilizando-se esquema fatorial, em delineamento inteiramente casualizado 4 x 3, com três repetições. A aplicação de P ocasionou incremento na produção de matéria seca da parte aérea e de grãos de arroz e no acúmulo de P na MSPA. Houve interação Si x P somente para o acúmulo de Si na MSPA do arroz.

Palavras-chave: *Oryza sativa*, produtividade, adubação fosfatada, silicatada.

ABSTRACT. Silicon and phosphorus in soils cultivated with upland rice. This work's aim was to evaluate the effects of different Si and P doses on dry matter aerial part (DMAP) production, grain production and Si and P rice plant contents. Two soils, RQo and LVdf, were used in the study. The treatments consisted of four doses of P (0, 80, 240, and 410; 0, 110, 330, and 560 mg dm⁻³, respectively for RQo and LVdf) and three doses of silicon (0, 240, and 410; 0, 330, and 560 mg dm⁻³, respectively for RQo and LVdf). The experimental design was a 4x3 factorial with three repetitions. Increased P fertilization raised the dry matter production of aerial part and rice grains, and P accumulation in DMAP. There was Si x P interaction only for the silicon accumulated in DMAP of rice plants.

Key words: *Oryza sativa*, productivity, phosphated fertilization, silicon.

Introdução

Embora o silício seja um dos elementos químicos de maior ocorrência nas fases sólida e líquida do solo, bem como depositado na parede celular ou presente na seiva das plantas acumuladoras cultivadas, seu papel na agricultura é ainda pouco estudado, principalmente por não ser o Si considerado essencial às plantas. Contudo, em numerosos casos, tem sido demonstrado o efeito benéfico de sua aplicação, no aumento da produção de diversas culturas como a cana-de-açúcar, arroz e outras gramíneas (Epstein, 1994).

O silício está presente na solução do solo sob a forma pouco dissociada Si(OH)₄, porém sujeita a interagir ativamente com o complexo sortivo. Assim, a sílica dissolvida nos solos é um soluto ativo, não

um componente passivo, que será obrigatoriamente perdido por lixiviação logo após a intemperização das rochas (McKeague e Cline, 1963).

Os primeiros trabalhos sobre adsorção de silício e/ou interações silício-fósforo nos solos datam do final da década de 20 do século XX, já havendo, portanto, consenso sobre alguns aspectos envolvendo a dinâmica destes dois elementos. Assim, o efeito do silício no crescimento vegetal parece estar associado com as reações desse elemento com o P no solo e na planta. A similaridade química de duas formas aniônicas de P e Si, H₂PO₄⁻ e H₃SiO₄⁻, é grandemente responsável por isto (McKeague e Cline, 1963; Hingston *et al.*, 1972).

No Brasil, por ser o arroz de sequeiro cultivado predominantemente em solos altamente

intemperizados e por ser considerado uma planta eficiente acumuladora de Si, é possível ocorrer, à semelhança dos resultados obtidos com a aplicação do Si em arroz irrigado em outros países, efeitos positivos da aplicação desse elemento na cultura do arroz de sequeiro, dado os benefícios atribuídos ao uso do silício no solo (Korndörfer *et al.*, 1999; Faria, 2000; Barbosa Filho *et al.*, 2001).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de diferentes doses de Si e P na produção de matéria seca da parte aérea, na produção de matéria seca de grãos e no acúmulo de Si e P na parte aérea do arroz cultivado em dois solos da região dos cerrados sob condições de casa-de-vegetação.

Material e métodos

Foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) textura muito argilosa, oxidado, no município de Lavras, Estado de Minas Gerais, e de um Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), textura arenosa, caulínítico, no município de Itutinga, Estado de Minas Gerais, coletadas na camada de 0-20 cm, sob vegetação nativa.

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 5 mm para os experimentos com plantas em casa-de-vegetação. Parte das amostras foi passada em peneira de 2 mm e submetida a análises física, química e mineralógica. A análise física envolveu a determinação da composição granulométrica da TFSA, pelo método da pipeta (Day, 1965), com cinco replicatas. As análises químicas realizadas incluíram pH, complexo sortivo, C orgânico e micronutrientes, com três replicatas por determinação. A disponibilidade de P foi avaliada por Mehlich-1 (Embrapa, 1997) e resina de troca iônica (Rajj e Feitosa, 1980). Os óxidos de Fe livres totais da fração argila foram obtidos por meio de extrações sucessivas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fe_d) (Mehra e Jackson, 1960), os óxidos menos cristalinos da fração argila com oxalato ácido de amônio (Fe_o) (Schwertmann, 1964) e os óxidos do ataque sulfúrico da terra fina foram determinados conforme Vettori (1969), com modificações de Embrapa (1997). Foram quantificados na argila desferrificada, por meio de análise térmica diferencial, os teores de gibbsita e caulinita. Na Tabela 1 são apresentados os resultados da caracterização física, química e mineralógica dos solos estudados, antes da aplicação dos tratamentos.

A determinação do Si solúvel nos solos foi realizada conforme método proposto por McKeague e Cline (1963).

Tabela 1. Principais atributos químicos, físicos e mineralógicos de amostras de solos coletadas na profundidade de 0 a 20 cm, antes da aplicação dos tratamentos.

Atributos dos solos	Solos	
	RQo	LVdf
pH em água	5,0	4,8
Al^{+3} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,9	1,1
Ca^{+2} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,4	0,4
Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,1	0,2
K (mg dm^{-3})	23,0	30,0
H + Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	4,5	9,5
P-Mehlich-1 (mg dm^{-3})	6,8	1,1
P-resina (mg dm^{-3})	5,4	12,9
B (mg dm^{-3})	0,3	0,4
Cu (mg dm^{-3})	1,0	2,1
Fe (mg dm^{-3})	60,2	73,1
Mn (mg dm^{-3})	6,4	11,4
Zn (mg dm^{-3})	0,1	0,1
SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,6	0,7
t ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	1,5	1,7
T ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	5,1	10,2
V (%)	11,8	6,9
m (%)	60,0	61,1
MO (dag kg^{-1})	1,7	3,9
Si (mg dm^{-3})	1,3	6,2
Areia grossa (g kg^{-1})	470,0	110,0
Areia fina (g kg^{-1})	460,0	60,0
Silte (g kg^{-1})	0,0	110,0
Argila (g kg^{-1})	70,0	720,0
SiO_2 (g kg^{-1})	30,6	153,0
Al_2O_3 (g kg^{-1})	35,8	262,0
Fe_2O_3 (g kg^{-1})	11,0	237,0
TiO_2 (g kg^{-1})	4,7	202,0
P_2O_5 (g kg^{-1})	0,0	1,4
Fe_d (g kg^{-1})	2,0	138,8
Fe_o (g kg^{-1})	0,1	2,8
Ct (g kg^{-1})	778,0	160,0
Gb (g kg^{-1})	59,0	310,0

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, arranjado num fatorial 4x3, com três repetições. Os tratamentos incluíram quatro doses de P e três doses de Si (Tabela 2).

Tabela 2. Tratamentos e doses de Si e P usadas no experimento.

Tratamentos	Solos	
	RQo	LVdf
Doses de Si (mg dm^{-3})		
Si1	0	0
Si2	240	330
Si3	410	560
Doses de P (mg dm^{-3})		
P1	0	0
P2	80	110
P3	240	330
P4	410	560

Dois experimentos foram realizados em casa-de-vegetação com a cultura do arroz. Um com RQo e outro com LVdf, em vasos com capacidade para 3 dm^3 de solo, preenchido com 2,7 dm^3 de solo. As amostras de solo contidas nos vasos foram submetidas a três incubações sequenciais por um período de 30 dias cada uma, sob condições de umidade equivalente a 60% do volume total de poros (VTP) ocupados por água (Freire *et al.*, 1980), controlada por pesagem diária. A

primeira, com calcário dolomítico calcinado micropulverizado (35% CaO e 14% MgO), na quantidade indicada para elevar o valor da saturação por bases a 50%. A segunda constou de três doses de Si que constituíram os tratamentos, na forma sólida (H_4SiO_4 ; 60% SiO_2). No RQo, as doses foram 0, 240 e 410 mg dm^{-3} de Si e, para o LVdf, 0, 330 e 560 mg dm^{-3} de Si, definidas com base nas doses de P (Tabela 2).

A terceira incubação (fertilização básica), idêntica nos dois solos, à exceção do P (fator em estudo), correspondeu aos seguintes teores de nutrientes na forma de sais p.a. em mg dm^{-3} de solo: 100 de N; 150 de K; 62 de S; 0,81 de B; 1,3 de Cu; 5,0 de Zn; 3,6 de Mn; 1,6 de Fe e 0,15 de Mo. Os nutrientes foram aplicados em forma de solução e misturados ao solo para maior uniformização. As fontes utilizadas foram: K_2SO_4 ; $(NH_4)_2HPO_4$; NH_4NO_3 ; KH_2PO_4 ; H_3PO_4 ; $MnSO_4 \cdot 2H_2O$; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$; $(NH_4)_6MO_7O_{24} \cdot 4H_2O$; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ e H_3BO_3 . No RQo as doses de P foram, 0, 80, 240 e 410 mg dm^{-3} de P e, para o LVdf, 0, 110, 330 e 560 mg dm^{-3} de P (Tabela 2), definidas em função do P remanescente (Alvarez *et al.*, 2000).

Após o período de incubação dos solos com os tratamentos em casa-de-vegetação, foram coletadas subamostras de solo de cada unidade experimental (vasos) para as determinações analíticas (Tabela 3).

Tabela 3. Características dos solos após a correção da acidez, adubação básica e aplicação dos tratamentos.

Trata- mentos ¹	Solo	pH	Atributos									
			K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	T	m	V	P-resina	Si
			mg dm^{-3}	cmol dm^{-3}			%		mg dm^{-3}			
P1Si1	RQo 5,1	119	1,3	0,7	0,3	2,9	5,2	11,0	44,6	6,1	2,7	
P1Si2	RQo 5,0	121	1,1	0,9	0,3	3,0	5,4	11,0	44,2	6,0	5,5	
P1Si3	RQo 5,0	120	1,2	1,2	0,3	3,0	5,7	9,7	47,7	6,8	6,7	
P2Si1	RQo 5,1	120	1,2	0,9	0,3	2,9	5,3	11,0	45,4	11,6	3,0	
P2Si2	RQo 4,9	117	1,2	0,8	0,3	3,1	5,4	12,7	42,6	12,5	5,6	
P2Si3	RQo 5,0	120	1,2	0,7	0,3	3,1	5,3	11,7	41,6	11,9	6,9	
P3Si1	RQo 5,0	121	1,2	0,7	0,3	3,5	5,8	12,0	40,0	47,1	3,2	
P3Si2	RQo 5,0	116	1,2	0,8	0,3	3,5	5,8	11,0	40,5	48,6	5,8	
P3Si3	RQo 5,0	114	1,1	1,0	0,3	3,5	5,9	11,0	40,9	48,2	5,9	
P4Si1	RQo 5,0	117	1,3	0,7	0,3	3,9	6,2	11,0	37,2	83,1	3,3	
P4Si2	RQo 5,0	118	1,4	0,6	0,2	4,3	6,7	8,0	35,1	84,2	4,8	
P4Si3	RQo 5,0	115	1,3	0,7	0,3	4,3	6,6	11,0	34,6	82,6	5,3	
P1Si1	LVdf 5,0	130	2,4	1,7	0,1	5,4	9,7	2,0	44,7	5,9	5,3	
P1Si2	LVdf 5,0	125	2,5	1,5	0,1	5,6	10,0	2,0	43,9	5,9	12,4	
P1Si3	LVdf 5,0	127	2,5	1,7	0,2	5,8	10,4	3,0	43,9	6,2	14,9	
P2Si1	LVdf 4,9	130	2,5	1,7	0,2	6,5	11,1	4,0	41,0	13,0	6,0	
P2Si2	LVdf 5,0	125	2,5	1,6	0,2	6,3	10,7	4,0	41,4	14,1	12,4	
P2Si3	LVdf 5,0	133	2,6	1,8	0,2	6,1	10,8	4,0	44,0	12,9	14,7	
P3Si1	LVdf 4,8	135	2,5	1,9	0,2	6,5	11,4	4,0	42,5	40,9	6,9	
P3Si2	LVdf 4,8	137	2,6	1,8	0,2	7,3	12,0	4,0	39,1	51,9	12,6	
P3Si3	LVdf 5,0	143	2,6	1,7	0,2	6,3	11,0	4,0	42,4	55,6	15,8	
P4Si1	LVdf 4,8	144	2,5	1,7	0,2	7,1	11,6	4,0	39,2	103,2	7,5	
P4Si2	LVdf 4,9	143	2,5	1,6	0,2	6,5	11,1	4,0	40,8	107,8	14,2	
P4Si3	LVdf 4,8	128	2,4	1,8	0,3	7,9	12,5	6,7	36,8	108,6	13,9	

¹ P1Si1: dose zero de P e Si e assim sucessivamente, conforme a Tabela 2.

Decorridos 30 dias da última incubação, procedeu-se o plantio. Sete sementes de arroz por vaso foram semeadas com igual procedimento para

os dois solos. Após 20 dias, foram efetuados desbastes deixando-se duas plantas de arroz por vaso. Os vasos foram mantidos com umidade em 60% do VTP (Freire *et al.*, 1980), por meio de pesagens diárias dos vasos e adição de água deionizada. O cultivar de arroz utilizado foi Primavera.

As adubações de cobertura com N e K foram realizadas de forma diferenciada de acordo com o crescimento das plantas. Os tratamentos que proporcionaram, em cada solo, um crescimento normal das plantas, receberam 265 e 185 mg dm^{-3} de N e K, respectivamente, parcelados em sete aplicações. Os tratamentos cujas plantas apresentaram um menor crescimento receberam coberturas proporcionalmente menores, 180 e 120 mg dm^{-3} de N e K, respectivamente, evitando-se, assim, aplicações excessivas dos nutrientes.

Folhas bandeiras das plantas de arroz foram colhidas no período do florescimento, quando 50% das panículas estavam visíveis (Raj *et al.*, 1996), e as plantas inteiras foram colhidas por ocasião da maturação fisiológica dos grãos, cortando-se as plantas rente ao solo. O material vegetal foi seco em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura entre 65 e 70°C, e moído em moinho tipo Wiley. Foi determinado o teor de P total por meio da mineralização por digestão nítrico-perclórica (Malavolta *et al.*, 1997; Braga e Defelipo, 1974); o teor de Si foi determinado pelo método proposto por Elliott e Synder (1991). Nas plantas colhidas ao final do ciclo, determinou-se a matéria seca da parte aérea (MSPA) e dos grãos (MSGR).

O P e o Si acumulados na parte aérea foram calculados multiplicando-se a massa seca da parte aérea pelo teor de P ou Si e dividindo este valor por 1.000.

As variáveis foram submetidas a análises de variância, utilizando o programa de análises estatísticas SISVAR (Ferreira, 2000).

Resultados e discussão

A aplicação de P influenciou significativamente as produções de matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de grãos (MSGR) e o acúmulo de P e Si na MSPA do arroz nos solos em estudo (Tabela 4).

O P é indispensável em uma série de processos metabólicos dos vegetais, conforme verificado no experimento, onde as plantas cultivadas em solos que não receberam aplicação desse nutriente apresentaram sintomas visuais típicos de deficiência deste nutriente. As folhas mais novas do arroz apresentaram uma coloração verde-azulada intensa e as mais velhas apresentaram uma coloração bronze nas pontas, com morte de algumas folhas mais velhas. Verificou-se, também, reduzido perfilhamento por planta.

Tabela 4. Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), produção de matéria seca de grãos (MSGR), fósforo acumulado na MSPA (P-MSPA) e silício acumulado na MSPA (Si-MSPA) do arroz cultivado nos solos RQo e LVdf.

Valores de F	Quadrado médio			
	MSPA	MSGR	P-MSPA	Si-MSPA
Neossolo Quartzarênico órtico (RQo)				
Doses de P	2518,63**	986,19**	2761,21**	5451,61**
Doses de Si	4,86 ns	83,03 ns	3,44 ns	15312,65**
P x Si	27,94 ns	37,21 ns	27,07 ns	3772,18*
C.V. (%)	10,96	16,48	10,97	15,17
Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf)				
Doses de P	4904,55**	2612,99**	5122,00**	52315,01**
Doses de Si	70,11 ns	4,36 ns	70,33 ns	137015,35**
P x Si	33,85 ns	51,44 ns	33,56 ns	35662,36**
C.V. (%)	11,14	14,50	10,80	18,41

Ajustaram-se equações de regressão que expressam o efeito das doses de P aplicadas na produção de MSPA. Assim, observa-se alta resposta na produção de MSPA em função das doses de P (Figuras 1a e 1b). Tratando-se de solos muito baixo a baixos teores de P (Tabela 1), era de se esperar que a adubação fosfatada promovesse aumentos significativos na produção de MSPA, porém ocorreu que, à medida que se elevou a quantidade do nutriente na adubação, não foram obtidos ganhos em produtividade proporcionalmente correspondentes aos incrementos nas doses do P e sim um ligeiro decréscimo na produção, ao elevar da terceira para a quarta dose de P em ambos os solos (Figuras 1a e 1b). Provavelmente, a aplicação do ácido fosfórico (H_3PO_4) nas amostras de solo que receberam as maiores doses de P contribuiu para um decréscimo nos valores de saturação por bases ($V\%$) e uma leve acidificação do solo ($H + Al$) (Tabela 3), ocasionando prejuízo no crescimento e desenvolvimento das plantas de arroz.

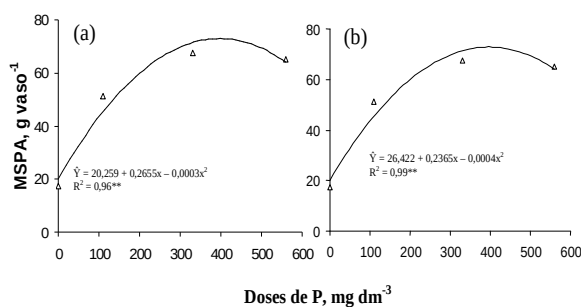


Figura 1. Matéria seca da parte aérea (MSPA) do arroz, em função das doses de P aplicadas ao solo RQo (a) e LVdf (b). (** significativo).

As doses de Si aplicadas não alteraram a produção de MSPA do arroz (Tabela 4), corroborando os relatos de Liang et al. (1994), Carvalho (2000), Mauad et al. (2003) e Pereira et al. (2003), que também não encontraram efeito do Si no crescimento de plantas de arroz. A ausência de

resposta à aplicação de Si pode estar relacionada com várias causas, dentre elas a baixa disponibilidade do elemento no solo (Tabela 3) e a diferença genotípica quanto à exigência e à capacidade de absorção do Si (Winslow, 1992; Barbosa Filho et al., 1998). Embora as diferenças de absorção de Si entre cultivares de arroz devam ser vistas com restrições, Majunder et al. (1985) também relataram ampla faixa de variação com a aplicação de Si em vários genótipos de arroz cultivados em solos deficientes em fósforo.

A produção de matéria seca de grãos (MSGR) acompanhou o comportamento da produção de MSPA e somente a aplicação de P exerceu efeito significativo para essa variável (Tabela 4). Sant'Ana (2000) obteve diferenças significativas para o perfilhamento de plantas de arroz de sequeiro entre as doses de P, o que mostra a capacidade de resposta desses cultivares ao nutriente. O P aumenta o número de perfilhos dos cereais em geral e, com isso, o número de panículas e, conseqüentemente, desempenha um importante papel na produção de grãos (Fageria, 1999). A equação quadrática foi a que melhor se ajustou aos dados de produção de MSGR em função das doses de P para o RQo (Figura 2a), indicando um efeito depressivo em dose acima de 240 mg dm^{-3} . Por outro lado, a produção de MSGR de plantas cultivadas no LVdf (Figura 2b) cresce respondendo a incrementos lineares com as doses de P. A maior produtividade alcançada com a dose de 560 mg dm^{-3} de P pode ser atribuída ao maior equilíbrio e vigor no desenvolvimento da planta, que neste caso teria fotoassimilados suficientes para o enchimento das espiguetas.

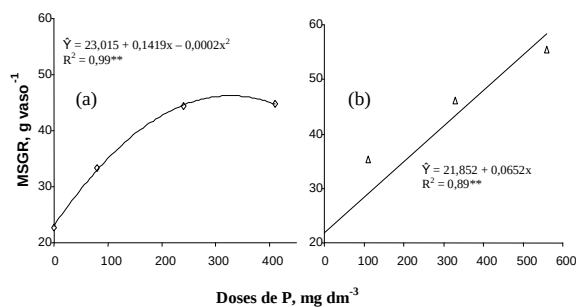


Figura 2. Produção de matéria seca de grãos (MSGR) do arroz, em função das doses de P aplicadas ao solo RQo (a) e LVdf (b). (** significativo).

Tendo em vista o efeito positivo da aplicação de Si no incremento da produção de grãos em vários trabalhos com arroz (Liang et al., 1994; Korndörfer et al., 1999; Faria, 2000), esperava-se também, nesse estudo, resposta para essa característica, entretanto a aplicação do elemento em diferentes doses não afetou as produções de MSGR das plantas crescidas

nos solos RQo e LVdf (Tabela 4). Estes resultados estão de acordo com os de Carvalho (2000) e Mauad *et al.* (2003), que também não obtiveram aumentos significativos com a aplicação do Si em plantas de arroz.

Pode-se, também, inferir no presente experimento que a ausência de resposta do arroz em produtividade com o aumento da adubação silicatada pode ser decorrente do somatório de diversos fatores, em especial os baixos teores de Si disponíveis no solo às plantas, mesmo após a aplicação do elemento (Tabela 3). O baixo teor de Si encontrado no LVdf dos tratamentos que não receberam adubação silicatada ($5,3 \text{ mg dm}^{-3}$) (Tabela 3) é consequência do seu avançado grau de intemperismo-lixiviação (Barbosa Filho *et al.*, 2001) e dos altos teores de óxidos de Fe e Al (Tabela 1), que são os principais responsáveis pela adsorção do Si da solução do solo (Mengel e Kirkby, 1987).

Korndörfer *et al.* (1999), trabalhando em casa-de-vegetação com quatro solos, sendo um deles o RQo, concluíram que o nível de suficiência do Si para os solos em questão, e para se atingir 90% da produção máxima, foi de $9,8 \text{ mg dm}^{-3}$, ou seja, valor acima dos encontrados no presente estudo com aplicação de Si, teores estes que podem ter sido insuficientes para ocasionar algum efeito desse elemento sobre a produção de grãos. Cabe ainda lembrar que os genótipos de arroz diferem bastante quanto à sua capacidade de absorver Si (Barbosa Filho *et al.*, 1998).

O acúmulo de P na parte aérea acompanhou o comportamento das produções de MSPA e MSGR, onde somente a aplicação de fósforo proporcionou efeito significativo para essa característica (Tabela 4). Os dados obtidos do P acumulado na MSPA ajustaram-se à equação quadrática, atingindo um ponto de máximo em função das doses de P aplicadas (Figuras 3a e 3b). O incremento no acúmulo de P na MSPA foi devido à maior produção de MSPA (Figuras 1a e 1b). Pode-se supor, neste caso, que o aumento no teor de P em solução (Tabela 3) tenha contribuído para a maior absorção desse nutriente e produção de matéria seca.

Quando se adubou com P, ocorreu uma diferenciação entre os solos RQo e LVdf quanto à proporção de P acumulado na MSPA do arroz, destacando-se as plantas cultivadas no LVdf que apresentaram um maior acúmulo, pois foi neste solo que se obteve a maior produção de MSPA (Figura 1b) e o maior teor de P na parte aérea (Tokura, 2004).

Nota-se que a partir da terceira dose de P (240 e 330 mg dm^{-3} , respectivamente para o RQo e LVdf, houve redução nos teores de P na produção de

MSPA (Figuras 1a e 1b). Essa redução foi acompanhada por menores conteúdos de P na MSPA (Figura 3a e 3b), indicando que a absorção de P nos solos em estudo foi acentuadamente limitada pelas condições químicas dos solos (Tabelas 3 e 4), conforme já comentado para a produção de MSPA.

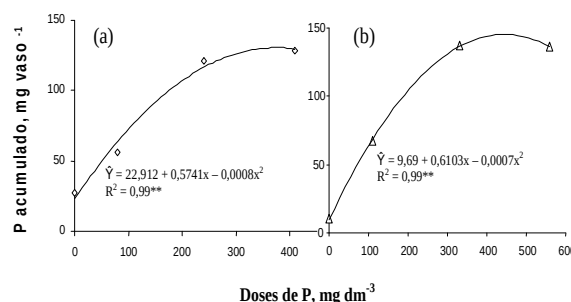


Figura 3. Fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz, em função das doses de P aplicadas no solo RQo (a) e LVdf (b). (** significativo).

A não significância do Si no acúmulo de P-MSPA era prevista, visto que em condições de pH similares àquelas de campo não seria possível deslocar P com baixos teores de Si disponível, uma vez que a energia de adsorção para P é muito superior que aquela para Si (Leite, 1997).

Ainda que tenha havido redução na produção de MSPA e no acúmulo de P-MSPA do arroz em ambos os solos, o mesmo não ocorreu com o acúmulo de Si-MSPA. Em virtude das gramíneas em geral apresentarem absorção ativa do Si (Galvez *et al.*, 1987). Isso pode ser verificado em ambos os solos com baixos teores de Si na solução (cerca de $2,7$ e $5,3 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente para RQo e LVdf), onde ocorreram acúmulos de Si-MSPA acima de 1%.

Para o acúmulo de Si na MSPA, houve efeito significativo individual da aplicação de P e de Si, e efeito significativo da interação dos fatores (Tabela 4). As equações lineares foram as que melhor se ajustaram aos dados de acúmulo de Si na parte aérea (Figuras 4a e 4b). O modelo linear sugere um aumento contínuo no acúmulo de Si na MSPA em função das doses desse elemento. Como o arroz é uma planta acumuladora de Si (Korndörfer *et al.*, 2001), à medida que as doses de Si aumentaram, o acúmulo de Si na planta também foi incrementado (Figuras 4a e 4b), porém esse aumento não se converteu em ganhos de MSPA. Os incrementos nas quantidades acumuladas de Si foram devidos, principalmente, aos aumentos verificados no teor de Si na MSPA com a aplicação desse elemento no solo, já que não houve efeito significativo para MSPA quando se adubou com este elemento (Tabela 4).

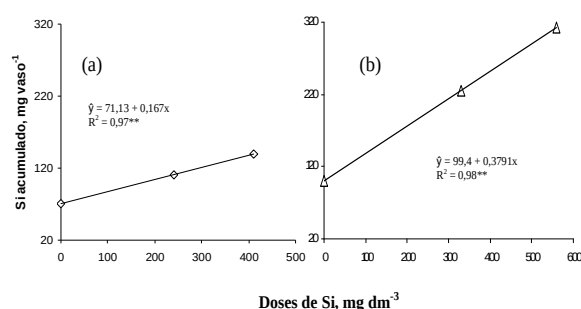


Figura 4. Silício acumulado na parte aérea das plantas de arroz, em função das doses de Si aplicadas no solo RQo (a) e LVdf (b). (** significativo).

A interação das doses de silício (abscissas) e de fósforo, estas últimas representadas pelas três retas da Figura 5a, revela um comportamento semelhante, ou seja, o acúmulo de Si na parte aérea das plantas de arroz cultivadas no RQo aumentou com as doses de Si, e esses aumentos foram maiores quando em combinação com o P. Assim, o efeito do silício no acúmulo deste elemento na MSPA do arroz cultivado no RQo parece estar associado com as reações desse elemento com o fósforo. A similaridade química das formas aniônicas de P e Si, $H_2PO_4^-$ e $H_3SiO_4^-$, respectivamente, é grandemente responsável por isso (McKeague e Cline, 1963; Hingston *et al.*, 1972), embora na dose de 410 mg dm⁻³ de P não foi possível ajuste de nenhum modelo que explicasse o comportamento da variável.

Para o solo LVdf (Figura 5b), ao contrário do RQo, o maior acúmulo de Si na parte aérea das plantas foi obtido na ausência de P. Provavelmente, a diminuição no Si acumulado com a adição de P deve-se ao efeito da diluição, isto é, o aumento na produção de MSPA (Figura 5b) não foi acompanhado por correspondente aumento na absorção de Si. Assim, o incremento da produção de MSPA em virtude do aumento das doses de P não foi acompanhado de uma absorção de Si na mesma proporção, ocorrendo diminuição do Si-MSPA (Figura 5b), o que corrobora os resultados obtidos por Méndez Baldeón (1995).

O maior acúmulo de Si verificado nos tratamentos com adição de P foi exclusivamente devido à maior produção de MSPA (Figuras 1a e 1b), contudo as plantas cultivadas no LVdf (Figura 5b) acumularam mais Si do que as cultivadas no RQo (Figura 5a). Essa observação está condizente com os teores de Si encontrados nos solos (Tabela 3). Segundo Malavolta (1980), a velocidade de absorção desse elemento pela planta cresce com sua concentração no meio externo.

Em outros trabalhos com plantas de arroz, os teores de Si na MSPA, em função da aplicação de Si ao solo, foram maiores do que os encontrados no presente estudo (entre 1,02 a 13,93 g kg⁻¹). Malavolta (1980) cita

teores variando entre 28 e 62,2 g kg⁻¹ de Si para o arroz irrigado, enquanto Méndez Baldeón (1995) encontrou valores máximos de 35 g kg⁻¹ de Si em plantas de arroz de sequeiro. Dessa forma, as doses de Si definidas em função do P-remanescente aqui utilizadas proporcionaram teores de Si solúveis considerados baixos em relação à literatura, o que provavelmente explica a quase ausência de resposta da cultura em relação ao fornecimento do elemento, ainda mais quando se considera que o arroz é uma espécie considerada acumuladora de Si.

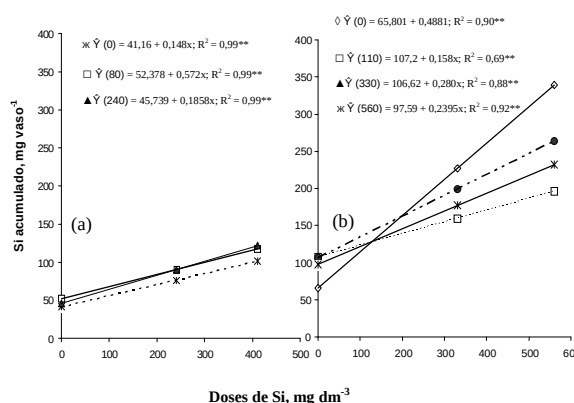


Figura 5. Interação silício e fósforo (mg dm⁻³) no acúmulo de Si na parte aérea do arroz cultivado no RQo (a) e LVdf (b). (** significativo a 1%).

Os teores de Si disponível encontrados nos solos dependeram dos tratamentos e do solo estudado (Tabela 3). No RQo, em razão do baixo teor de argila e de matéria orgânica (Tabela 1) e da baixa retenção de umidade, a interação do Si com a fase sólida foi menor, explicando, em parte, a menor reatividade do elemento neste solo.

Nos dois solos, admite-se que as plantas foram eficientes em absorver o Si disponível. Tais observações reforçam a definição de ser a planta de arroz reconhecida mundialmente como eficiente acumuladora de Si (Barbosa Filho *et al.*, 2001). No entanto, a ausência de resposta à aplicação de Si verificada neste estudo, em solos considerados com teores baixos do elemento, certamente está relacionada com os fatores já comentados por Winslow (1992) e Barbosa Filho *et al.* (1998). Finalmente, o fornecimento do elemento em níveis mais elevados pode ser importante, uma vez que se espera diferentes respostas dos cultivares de arroz em relação à fertilização com o silício.

Conclusão

A aplicação de Si não influencia as produções de MSPA, MSGR e o acúmulo de P na parte aérea das plantas de arroz cultivadas nos RQo e LVdf.

A elevação das doses de Si aplicadas aumenta, de forma significativa, o acúmulo de Si na MSPA.

A aplicação de P incrementa a produção de MSPA, MSGR e P acumulado na MSPA das plantas de arroz.

Referências

- ALVAREZ, V.H. *et al.* Determinação de fósforo remanescente. *Soc. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000. (Boletim Informativo).
- BARBOSA FILHO, M.P. *et al.* Resposta do arroz de sequeiro à aplicação de silício. In: FERTBIO. 1998, Caxambu. *Anais...* Lavras: Universidade Federal de Lavras/Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Sociedade Brasileira de Microbiologia, 1998. p. 57.
- BARBOSA FILHO, M.P. *et al.* Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 25, p. 325-330, 2001.
- BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. *Rev. Ceres*, Viçosa, v. 21, n. 113, p. 73-85, 1974.
- CARVALHO, J.C. *Análise de crescimento e produção de grãos da cultura do arroz irrigado por aspersão em função da aplicação de escória de siderurgia como fonte de silício*. 2000. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v. 1, p. 545-556.
- ELLIOTT, C.L.; SNYDER, G.H. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. *J. Agric. Food Chem.*, Washington, D.C., v. 39, p. 1118-1119, 1991.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. *Manual de métodos de análise do solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1997.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Nat. Acad. Sci. Unit. St. Am.*, United States, v. 91, p. 11-17, 1994.
- FARIA, R.G. *Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo*. 2000. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.
- FAGERIA, N.K. Nutrição mineral. In: VIEIRA, N.R.A. *et al.* (Ed.). *A cultura do arroz no Brasil*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p. 173-196.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR (Sistema para Análise de Variância) para Windons versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.
- FREIRE, J.C. *et al.* Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 4, n. 1, p. 5-8, 1980.
- GALVEZ, L. *et al.* Silicon interactions with manganese and aluminum toxicity in Sorghum. *J. Plant Nutr.*, New York, v. 10, n. 9-16, p. 1139-1147, 1987.
- HINGSTON, F.J. *et al.* Anion adsorption by goethite and gibbsite. The role of the proton in determining adsorption envelopes. *J. Soil Sci.*, Oxford, v. 23, n. 2, p. 177-92, 1972.
- KORNDÖRFER, G.H. *et al.* Efeito do silicato de cálcio no teor de silício e na produção de grãos de arroz de sequeiro. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 23, p. 635-41, 1999.
- KORNDÖRFER, G.H. *et al.* Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. *J. Plant Nutr.*, New York, v. 24, p. 1071-1084, 2001.
- LEITE, P.C. *Interação Silício-Fósforo em Latossolo Roxo cultivado com sorgo em casa-de-vegetação*. 1997. Tese (Doutorado)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- LIANG, Y.C. *et al.* Silicon availability and response of rice and wheat to silicon in calcareous soils. *Comm. Soil Sci. Plant An.*, New York, v. 25, p. 2285-97, 1994.
- MAJUNDER, N.D. *et al.* Genetics of silica uptake in selected genotypes of rice (*Oriza sativa* L.). *Plant Soil*, The Hague, v. 88, p. 449-453, 1985.
- MALAVOLTA, E. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980.
- MALAVOLTA, E. *et al.* *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.
- MAUAD, M. *et al.* Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 27, p. 867-873, 2003.
- McKEAGUE, J.A.; CLINE, M.G. Silica in soils. II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. *Can. J. Soil Sci.*, Ottawa, v. 43, n. 1, p. 83-95, 1963.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soil and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, New York, v. 7, n. 5, p. 317-327, 1960.
- MÉNDÉZ BALDEÓN, J.R.M. *Efeito da ação alcalinizante e da competição entre silicato e fosfato na eficiência do termofosfato magnésiano em solos ácidos*. 1995. Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1995.
- MENGEL, K.E.; KIRKBY, G.A. Further elements of importance. In: *Principles of plant*. 4. ed. Worblaufen-Bern: International Potash Institute, 1987. p. 573-588.
- PEREIRA, H.S. *et al.* Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v. 27, p. 101-108, 2003.
- RAIJ, B. VAN. *et al.* *Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, Fundação IAC, 1996.
- RAIJ, B. VAN.; FEITOSA, C.T. Correlação entre o P extraído de solo por diversos extratores químicos extratores químicos e o absorvido pelo milho. *Bragantia*, Campinas, v. 39, n. 1, p. 51-57, 1980.
- SANT'ANA, E.V.P. *Comportamento de genótipos de arroz*

(*Oryza sativa* L.) de terras altas em dois níveis de fósforo em solo e in vitro. 2000. Dissertação (Mestrado)—Universidade Federal de Goiânia, Goiânia, 2000.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraktion mit ammoniumoxalat-Lösung. *Z. Pflanzenernähr, Bodenk*, v. 105, p. 194-202, 1964.

TOKURA, A.M. *Efeito do silício nas frações fosfatadas de solos cultivados com arroz de sequeiro*. 2004. Tese (Doutorado)—Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

VETTORI, L. *Métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. 24 p. (Boletim Técnico, 7).

WINSLOW, M.D. Silicon, disease resistance and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. *Crop Sci.*, Madison, v. 32, p. 1208-1213, 1992.

Received on February 01, 2006.

Accepted on July 20, 2006.