



**INTERAÇÕES SILÍCIO-FÓSFORO EM
LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO E
CAMBISSOLO CULTIVADOS COM MUDAS
DE EUCALIPTO**

RUY CARVALHO

1999

RUY CARVALHO

**INTERAÇÕES SILÍCIO-FÓSFORO EM LATOSSOLO VERMELHO-
ESCURO E CAMBISSOLO CULTIVADOS COM MUDAS DE
EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Doutorado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do grau de "DOUTOR".

Orientador

Prof. Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
1999**

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Carvalho, Ruy

Interações silício-fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro e Cambissolo cultivados com mudas de eucalipto / Ruy Carvalho. – Lavras : UFLA, 1999.
89 p : il.

Orientador: Antônio Eduardo Furtini Neto.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Interação silício-fósforo. 2. Adsorção de silício. 3. Adsorção de fósforo. 4. Dessorção de fósforo. 5. Solo. 6. Latossolo Vermelho-Escuro. 7. Eucalipto. 8. Muda. 9. Cambissolo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.81

-633.97342

RUY CARVALHO

**INTERAÇÕES SILÍCIO-FÓSFORO EM LATOSSOLO VERMELHO-
ESCURO E CAMBISSOLO CULTIVADOS COM MUDAS DE
EUCALIPTO**

**Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do curso de
Doutorado em Agronomia, área de
concentração em Solos e Nutrição de Plantas,
para obtenção do grau de "DOUTOR".**

APROVADA em 19 de março de 1999

Prof. Dr. Custódio Donizete dos Santos	UFLA
Profa. Dra. Janice Guedes de Carvalho	UFLA
Prof. PhD. Nilton Curi	UFLA
Prof. PhD. Jaime W. Vargas de Mello	UFV


Prof. Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto.
UFLA
(Orientador)

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

À minha esposa, Sandra, aos meus filhos, Doralice,
Pedro Paulo e Adriano.

A todas as pessoas, cientistas ou não, que
acreditam que **QUERER É PODER,**

DEDICO

À minha irmã, Engenheira Agrícola Rejene Carvalho (*in memoriam*),

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais, e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade concedida para a concretização deste Doutorado.

Ao Departamento de Química (DQI) da UFLA, pelo apoio institucional e pela ajuda incondicional de todos os seus professores, laboratoristas e demais servidores técnico-administrativos durante a realização do curso.

Aos meus pais, Antônio de Carvalho e Iracema dos Santos, pela vida.

Ao Prof. Dr. Antônio Eduardo Furtini Neto (DCS-UFLA), pela orientação segura, consistente, bem direcionada e pela importância que dá ao trabalho em equipe. Sua atuação foi de fundamental importância para que o objetivo maior desta pesquisa – criar uma interface entre Química pura e Ciência do Solo – fosse alcançado.

Ao Prof. PhD Nilton Curi (DCS-UFLA), pela escolha dos solos utilizados neste estudo, sugestões técnicas, valiosa experiência, profissionalismo, sentido de equipe e parceria.

À Prof^a Dr^a Janice Guedes de Carvalho (DCS-UFLA), pelas críticas e sugestões, e pelo que temos cientificamente em comum: o prazer de pesquisar o silício, ela, em plantas e eu, em solos.

Aos Professores PhD. Jaime W. Vargas de Mello (UFV) e Dr. Custódio Donizete dos Santos (DQI-UFLA). Ao primeiro, pelas sugestões desde a fase de planejamento experimental e ao segundo por ter incorporado a esta tese sua experiência com enzimas.

Ao Prof. PhD Luís Roberto Guimarães Guilherme (DCS-UFLA), por intermediar o diálogo científico entre o autor desta tese e o grupo de pesquisa do silício da Universidade do Havaí, Honolulu, EUA.

Ao Prof. PhD José Maria Lima (DCS-UFLA), pelo auxílio no ajuste dos dados de adsorção (isotermas) e apoio geral.

Ao Prof. Dr. Valdemar Faquin (DCS-UFLA), pela cessão de seus bolsistas de iniciação científica, cujo desempenho foi de grande importância para a conclusão desta tese.

Ao Prof. Vicente Gualberto (DCS-UFLA), pelas sugestões e ajuda sempre espontânea na área de informática.

A todo corpo docente do DCS-UFLA, pelo incentivo, sugestões, críticas e ensinamentos.

Aos laboratoristas, demais servidores técnico-administrativos e pessoal de apoio do DCS-UFLA, pelo empenho, competência, alegre convivência e, sobretudo, amizade.

Aos Professores Drs. Joel Augusto Muniz, Daniel Furtado Ferreira e Augusto Ramalho de Moraes, do Departamento de Ciências Exatas da UFLA, pelo auxílio na definição do modelo estatístico utilizado nesta pesquisa.

Aos Professores PhDs Renê Luís de Oliveira Rigitano (Departamento de Entomologia - UFLA) e José Tarcísio Lima (Departamento de Ciências Florestais - UFLA). O apoio técnico do primeiro muito contribuiu na fase de integralização dos créditos em algumas disciplinas da pós-graduação. O incentivo dos dois amigos balizou minha decisão de cursar o Doutorado.

Aos Professores Drs. Antônio Cláudio Davide, do Departamento de Ciências Florestais (UFLA), pela cessão das sementes de eucalipto; Luís Edson Mota de Oliveira e José Donizete Alves, do Departamento de Biologia (UFLA), pela ajuda no refinamento das técnicas de centrifugação; João Bosco dos Santos e

Romildo da Silva (Departamento de Biologia – UFLA), Manoel Alves Faria e Élio Lemos (Departamento de Engenharia – UFLA), Antônia dos Reis Figueira e Vicente Paulo Campos (Departamento de Fitopatologia – UFLA), e Gilberto Lage (Departamento de Ciências Exatas – UFLA), pelo apoio durante o período de integralização dos créditos em disciplinas da pós-graduação do DCS-UFLA.

À Prof^a Paula Ângela Umbelina Guedes Alcoforado, da Universidade Federal de Alagoas, doutoranda do DCS-UFLA, “colega de silício”, pela troca de informações e valiosas sugestões.

Ao doutorando do DCS-UFLA, Luís Arnaldo Fernandes, pela amizade, sugestões, críticas e parceria.

Aos pesquisadores da EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais), Enilson de Barros Silva, doutorando do DCS-UFLA, pelo apoio nas análises estatísticas, Júlio César de Sousa e Sara Maria Chalfoun pelas orientações sobre controle fitossanitário na fase de casa-de-vegetação.

Aos bolsistas de iniciação científica do DCS-UFLA, Antônio Claret de Oliveira Júnior, Alex Teixeira de Andrade e Edmar Fernando Corte, pela inestimável colaboração em todas as fases do trabalho; Daniel de Castro Rodrigues (DQI-UFLA), pelo apoio nas análises da fosfatase em plantas.

A todos os alunos de pós-graduação do DCS-UFLA, principalmente aqueles que comigo constituíram a “calourada” do primeiro semestre letivo de 1996. Nada mais estimulante que a troca de experiências entre colegas de “copo e de cruz”!

A todas as pessoas que, de todas as formas, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

RUY CARVALHO, filho de Antônio de Carvalho e Iracema dos Santos, nasceu em Lavras, Minas Gerais, em 18 de julho de 1952. Na mesma cidade iniciou e concluiu seus estudos de primeiro e segundo graus.

No período 1972-1975 cursou Engenharia Agrônômica na Escola Superior de Agricultura de Lavras (MG), atual Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Durante o ano de 1976 trabalhou como pesquisador da Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária (EMCAPA), Espírito Santo.

No período fevereiro a agosto de 1977 foi Professor Assistente da Fundação Faculdade de Agronomia Luiz Meneghel em Bandeirantes, Paraná.

Foi contratado como Professor Auxiliar da Escola Superior de Agricultura de Lavras em 1^o de setembro de 1977, lotado no Departamento de Química, disciplina Química Analítica.

Mestre em Química Inorgânica pelo Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, com treinamento em manuseio de resinas sintéticas de troca iônica e complexos. Curso iniciado em março de 1978, com dissertação defendida em junho de 1980.

Em dezembro de 1977 foi promovido por Concurso Público a Professor Titular de Química do Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais.

Em março de 1996 iniciou seu curso de Doutorado em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, defendendo tese em 19 de março de 1999, no DCS-UFLA.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	iii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	3
2.1 Formas de fósforo no solo.....	3
2.2 Adsorção e dessorção de fósforo no solo.....	5
2.3 Avaliação da disponibilidade de fósforo.....	8
2.3.1 Extratores de fósforo do solo.....	8
2.3.2 Frações fosfatadas e fosfatase em plantas.....	10
2.4 Reatividade do silício.....	12
2.5 Adsorção de silício.....	13
2.6 Competição entre silício e fósforo no solo.....	15
2.7 O papel do silício nas plantas.....	19
2.8 Determinação do silício disponível no solo.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1 Caracterização dos solos.....	24
3.2 Incubação dos solos, instalação e condução dos experimentos.....	26
3.3 Avaliação dos experimentos.....	27
3.3.1 Dosagem de silício no solo e nas plantas.....	28
3.3.2 Frações fosfatadas em plantas.....	29
3.3.3 Atividade "in vitro" da fosfatase ácida.....	30
3.4 Tratamento estatístico.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33

4.1 Atributos dos solos após a aplicação do silício.....	33
4.2 Matéria seca da parte aérea (MSPA).....	33
4.3 Fósforo na matéria seca da parte aérea.....	37
4.4 Silício solúvel no solo.....	43
4.5 Conteúdo de silício na MSPA.....	48
4.6 Fósforo disponível nos solos pelos extratores Mehlich-1 e Resina.....	58
4.7 Frações fosfatadas em plantas.....	61
4.7.1 Fósforo inorgânico (Pi).....	61
4.7.2 Fósforo orgânico (Po).....	64
4.8 Atividade da fosfatase ácida.....	69
5 CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74
ANEXO.....	83

RESUMO

CARVALHO, Ruy. **Interações silício-fósforo em Latossolo Vermelho-Escuro e Cambissolo cultivados com mudas de eucalipto.** Lavras: UFLA, 1999. 89p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)*

Com o objetivo de estudar as interações P-Si nas camadas superficiais (0-20cm de profundidade) de Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado e de Cambissolo fase campo cerrado da zona fisiográfica Campos das Vertentes (MG), foram conduzidos dois experimentos em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (MG), no período de agosto de 1997 a maio de 1998. Cada solo foi submetido a três incubações sequenciais: $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ p.a. para manter o pH em torno de 6,0; fertilização básica, incluindo o P em dose única calculada para manter $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ de P em solução; e seis doses de silício (CaSiO_3) definidas com base na dose P. Mudas de *Eucalyptus grandis* foram cultivadas por 120 dias em vasos com capacidade para 3 dm^3 de solo. Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), conteúdos de P e Si na MSPA, Si solúvel e P extraído dos solos pelos extratores Mehlich-1 e Resina, e frações fosfatadas e atividade da fosfatase em plantas foram avaliados aos 60, 90 e 120 dias após o transplântio das mudas para os vasos. Ajustaram-se equações de regressão múltipla para essas variáveis em função das doses de Si e das épocas de avaliação (fatorial 6×3 com 4 repetições; delineamento inteiramente casualizado). Mudas cultivadas no Cambissolo (mais caulinita e menos Si solúvel) tiveram ganho de 15,25% no conteúdo de P na MSPA. Extratores de P do solo, frações fosfatadas e atividade da fosfatase em plantas não mostraram sensibilidade para avaliar a interação P-Si nestes solos.

*Comitê Orientador: Antônio Eduardo Furtini Neto - UFLA (Orientador), Custódio Donizete dos Santos - UFLA, Janice Guedes de Carvalho - UFLA, Nilton Curi - UFLA, Jaime W. Vargas de Mello - UFV.

ABSTRACT

CARVALHO, Ruy. **Silicon-phosphorus interactions in Dark-Red Latosol (Oxisol) and Cambisol (Inceptisol) cultivated with cuttings of eucalyptus.** Lavras: UFLA, 1999. 89p. (Thesis – doctorate in soil and nutrition of plant)*.

With the objective of studying the P-Si interactions in the surface layers (0-20 cm in depth) of Dark-Red Latosol cerrado phase and of Cambisol campo cerrado phase of the physiographic zone Campos das Vertentes (MG), two experiments were conducted in greenhouse in the Soil Science Department of the Universidade Federal of Lavras (MG), over the period of August 1997 to May 1998. Each soil was submitted to three sequential incubations: $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ p.a. to keep pH around 6.0; basic fertilization, including P in a single dose calculated to maintain 0.2 mg.L^{-1} of P in solution; and six doses of Si (CaSiO_3) defined on the basis of the dose of P. Cuttings of *Eucalyptus grandis* were cultivated for 120 days in pots with 3 dm^3 capacity of soil. Production of dry matter of the aerial part (DMAP), contents of P and Si in the DMAP, soluble Si and P extracted from the soils by Mehlich-1 and Resina, and phosphate fractions and phosphatase activity in plants were evaluated at 60, 90 and 120 days after the transplanting of cuttings to the pots. Multiple regression equations to these variables were adjusted in terms of doses of Si and of the evaluations times (6 x 3 factorial with 4 replications; completely randomized design). Cuttings cultivated in the Cambisol (more kaolinite and less soluble Si) presented gain of 15.25% in contents of P in the DMAP. P extractors from the soil, phosphated fractions and phosphatase activity in plants did not show sensitivity at all to evaluate the P-Si interaction in these soils.

*Guidance Committee: Orientador: Antônio Eduardo Furtini Neto - UFLA (Major Professor), Custódio Donizete dos Santos - UFLA, Janice Guedes de Carvalho - UFLA, Nilton Curi - UFLA, Jaime W. Vargas de Mello - UFV.

1 INTRODUÇÃO

É um fato bastante conhecido que os solos ácidos de regiões tropicais e subtropicais, mais ricos em argilominerais de baixa atividade e em óxidos de ferro e de alumínio, “fixam” fósforo e, por isso, necessitam de aplicações deste nutriente em quantidades bem maiores do que aquelas exigidas pelas culturas. É também consensual entre os pesquisadores que o fósforo adsorvido às superfícies oxídicas da fração argila é a principal causa da “fixação” do nutriente.

Os primeiros trabalhos sobre adsorção de silício e/ou interações silício-fósforo em solos datam do final da década de 1920, já havendo, portanto, consenso sobre alguns aspectos envolvendo a dinâmica dos dois elementos no solo: (a) fosfato e silicato são retidos pelos óxidos de ferro e de alumínio da fração argila, podendo assim competir entre si pelos mesmos sítios de adsorção; (b) silicato desloca fosfato das superfícies oxídicas e vice-versa; (c) as concentrações dos dois elementos na fase líquida são governadas pelas reações químicas de adsorção.

Houve grande produção de trabalhos sobre silício em solos e plantas, notadamente gramíneas, nos anos 1960 e 70, com destaque para os pesquisadores da Universidade do Havaí, em Honolulu (EUA). O recuo verificado nos anos posteriores, pelo menos até o início dos anos 90, pode ser atribuído ao fato de o silício, ao contrário do fósforo, não ser reconhecido como elemento essencial às plantas, embora existam evidências de sua importância no aumento da produção de diferentes tipos de gramíneas.

Sob condições de casa-de-vegetação ou de campo, a grande maioria dos trabalhos nessa área utiliza silicatos como fonte de silício. Na forma de silicato de cálcio (CaSiO_3 ; ~31% Si) ou como escórias de siderurgia (~20% de CaSiO_3), o

silício vem sendo aplicado ao solo numa etapa anterior à fosfatagem, à semelhança do que se faz com os calcários na prática da calagem. Tratando-se de um produto conhecido como corretivo de acidez, torna-se difícil afirmar se os ganhos em dessorção de fósforo foram uma decorrência apenas do incremento do pH ou do efeito do silício em deslocar o fósforo, embora pareça clara a ação combinada dos dois elementos. Além deste aspecto, destaca-se que as plantas indicadoras cultivadas, gramíneas no caso, são acumuladoras de silício. Assim sendo, os ganhos em produção podem ter ocorrido mais pelo efeito nutricional do silício do que pelo acúmulo do fósforo dessorvido em seus tecidos. Há, portanto, a necessidade de isolar o “efeito pH” do “efeito silício” e, se possível, dimensionar esse último.

Parece salutar a inferência de um benefício aparentemente sustentável do “efeito silício” no que se refere ao emprego das escórias de siderurgia para minimizar as pesadas adubações fosfatadas. Afinal, segundo dados recentes da Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos (ANDA, 1997), é de 1,5 milhão de toneladas por ano o consumo brasileiro de P_2O_5 como fertilizante. Em termos de superfosfato triplo (44% P_2O_5), este consumo representa um gasto anual de superior a 1,0 bilhão de reais.

Este trabalho teve por objetivo avaliar sob condições de casa de vegetação, se o silício aplicado ao solo após a fertilização fosfatada é capaz de dessorver parte do fósforo previamente retido, disponibilizando-o às plantas. Os estudos foram realizados em dois solos bastante representativos de Minas Gerais e do Brasil, com teores semelhantes de argila e óxidos de ferro “totais”, e diferentes teores de caulinita e gibbsita cultivados com eucalipto, uma espécie não acumuladora de silício.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Formas de fósforo no solo

O fósforo (P) no solo está desigualmente distribuído em cinco compartimentos: precipitado com Al, Fe ou Ca (P precipitado), adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila (P adsorvido), em solução (P solução), na forma orgânica (P orgânico) ou fazendo parte de compostos marcadamente insolúveis (P mineralogicamente estável). Esses compartimentos exibem diferentes capacidades de “fixação” (retenção) e, portanto, de liberação do P como nutriente disponível às raízes das plantas na solução do solo. Em quaisquer deles, em função do pH, o P ocorre nas formas aniônicas H_2PO_4^- (fosfato diácido), HPO_4^{2-} (fosfato monoácido) ou PO_4^{3-} (fosfato) (Kamprath, 1977; Volkweiss e Raij, 1977; Sanchez e Uehara, 1980; Bahia Filho, 1982; Raij, 1991; Vale et al., 1993).

Os solos podem apresentar de 100 a 2500 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P total na camada arável (Vale et al., 1993). A participação do P orgânico no conteúdo total varia de 25 a 75%, sendo comuns quantidades equivalentes aos teores de P inorgânico. De modo geral, fatores que influenciam o teor de matéria orgânica, tais como umidade, acidez, atividade biológica e temperatura, determinam os percentuais das frações orgânica e inorgânica de P (Fassbender, 1986).

O “P solução” ou fator intensidade representa o P dissolvido (H_2PO_4^-) e prontamente disponível como nutriente às plantas, em concentrações muito baixas (Larsen, 1971). Da solução, os ânions H_2PO_4^- movimentam-se por difusão até a superfície das raízes onde são absorvidos. Há, portanto, uma diminuição do “P solução”, que é compensada com a adubação fosfatada ou pela liberação das

formas “P precipitado” e “P adsorvido” (Volkweiss e Raij, 1977; Sanchez e Uehara, 1980).

Estas formas capazes de manter um equilíbrio mais ou menos rápido de ressuprimento do “P solução” foram denominadas “P lábil” (fator quantidade) por Larsen (1967). O restante do P entra em equilíbrio com o “P solução” muito lentamente, sendo chamado de “P não lábil”. O P adicionado como adubo inicialmente é solubilizado, enriquecendo a solução do solo. Da solução, a maior parte do material solúvel é transformada em “P adsorvido”, “P precipitado” ou “P mineralogicamente estável” (não lábil).

Alguns autores (Volkweiss e Raij, 1977; Baldeon, 1995) consideram o P orgânico de solos cultivados como não lábil, visto que necessita ser mineralizado através da decomposição microbiana da matéria orgânica. Nestes solos, a taxa de mineralização é insignificante em relação às necessidades da planta. Entretanto, conforme relato de Vale et al. (1993), a contribuição do P orgânico como forma lábil vai depender do teor de matéria orgânica e, mais importante, da relação C/P da matéria orgânica.

A disponibilidade para as plantas do P nativo ou do P adicionado ao solo como adubo está diretamente relacionada a fatores diversos que podem ser inferidos das discussões anteriores (Camargo et al., 1974; Bahia Filho, 1982; Raij, 1991; Vale et al., 1993): (a) poder tampão de fósforo ou capacidade da fase sólida em ressuprir a solução pela solubilização de parte do “P precipitado” ou dessorção de uma fração do “P adsorvido”. O poder tampão depende basicamente de algumas propriedades do solo, dentre as quais destacam-se o teor de argila e o pH; (b) difusão ou transporte de íons H_2PO_4^- da solução para a superfície das raízes por gradiente de concentração; (c) alterações rizosféricas promovidas pelas plantas ou aspectos relacionados com o crescimento e morfologia das raízes; (d)

interferência microbiana das associações micorrízicas minimizando o fator transporte.

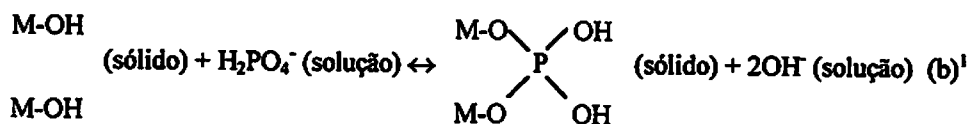
2.2 Adsorção e dessorção de fósforo no solo

A literatura é rica em trabalhos abordando a retenção de P pela fase sólida inorgânica de solos ácidos. Há um consenso entre os pesquisadores segundo o qual a reação dominante dos componentes do solo com o ânion H_2PO_4^- em baixas concentrações ($<10^{-1} \text{ mmol.L}^{-1}$) é um processo de adsorção (Muljadi, 1966; Fox e Kamprath, 1970; Hingston et al., 1972; Leal e Veloso, 1973; Souza et al., 1991). Portanto, em detrimento dos outros quatro compartimentos, o P adsorvido é a principal forma de retenção (fixação) do nutriente pelos solos ácidos, sendo de fundamental importância a caracterização e manejo do solo em função do seu poder tampão de P, ou seja, a minimização da adsorção e a maximização da dessorção.

O mecanismo de adsorção-dessorção é um fenômeno de superfície e, portanto, o tamanho médio dos constituintes mineralógicos da fração argila do solo destaca-se como um dos principais fatores que influenciam essas reações (Souza et al., 1991). Curi e Franzmeier (1984), Gualberto et al. (1987) e Resende et al. (1988) demonstraram que as condições ambientais do solo interferem no tamanho dos minerais de argila e, por consequência, na capacidade de retenção de P pelos solos.

A reação de adsorção de P à superfície dos minerais de argila (óxidos de Fe e Al) é um processo de troca de ligantes do complexo de superfície em que hidroxilas (OH^-) e/ou moléculas de água (H_2O) previamente coordenadas aos cátions Fe^{+3} ou Al^{+3} são deslocadas pelos íons H_2PO_4^- , formando um novo

complexo de superfície (Hingston et al., 1972; Volkweiss e Raij, 1977), conforme esquema abaixo:



Nessas reações, M é um íon Fe^{+3} ou Al^{+3} , M-OH (sólido) e $(\text{M-OH})_2$ (sólido) são sítios positivos de adsorção protonados em ambientes de baixo pH, ricos em H^+ . As outras cinco coordenações de M não mostradas são satisfeitas por ligações no interior dos minerais (Volkweiss e Raij, 1977). Teoricamente, segundo os autores citados, a reação (b) é a de ocorrência mais provável, pelo menos numa situação de equilíbrio, visto que a ligação de duas unidades de M com a formação de um complexo binuclear é energeticamente mais favorável. Este parece ser o caso da adsorção de H_2PO_4^- à superfície da goethita (FeOOH).

Uma análise das reações (a) e (b) baseada no Princípio de Le Chatelier-Braun de deslocamento dos equilíbrios químicos (Mahan, 1977) permite visualizar como certas propriedades dos solos afetam a fixação de P. Elevação do pH pela calagem, por exemplo, promove aumento da concentração e da atividade dos íons OH^- em solução deslocando os equilíbrios para a esquerda; conseqüentemente, haverá maior quantidade de íons H_2PO_4^- em solução prontamente disponíveis para as plantas. Em contrapartida, solos que apresentam grandes quantidades de superfícies contendo Fe ou Al têm alta capacidade de retenção de P. Esta característica, que não pode ser modificada em solos

¹ Modificado de Volkweiss e Raij (1977)

agrícolas, contribui para deslocar os equilíbrios das reações (a) e (b) para a direita. Uma inferência importante merece destaque: o fenômeno de adsorção-dessorção de P é uma reação química dependente de pH, fato que atribui à calagem relevância prática como forma de maximizar a dessorção de fósforo.

Diversos autores demonstraram que, em solos ácidos, os óxidos de Fe da fração argila são os principais responsáveis pela adsorção de P em detrimento de outros minerais como a gibbsita e a caulinita (Hingston et al., 1974; Bahia Filho, 1982; Souza et al., 1991; Curi, 1993).

Estudando 39 Latossolos do Planalto Central brasileiro com diferentes características texturais e mineralógicas, Bahia Filho (1982) concluiu que a goethita foi o principal componente da fração argila responsável pelas variações observadas na capacidade máxima de adsorção de P. Resultado semelhante foi obtido por Souza et al. (1991) em pesquisa de adsorção-dessorção de P em Latossolos da mesma região. Hingston et al. (1974) e Souza et al. (1991) concluíram também que os ânions adsorvidos ao Al^{+3} na superfície da gibbsita são mais lábeis (menos retidos) que aqueles entre o Fe^{+3} da goethita. Curi (1993) demonstrou que o Latossolo mais amarelado (Latossolo variação Una) apresentou maior adsorção máxima e menor dessorção de P que o Latossolo Roxo. A goethita, cuja dimensão média dos cristais é menor do que aquela da hematita (Fe_2O_3) sendo mais abundante naquele solo, é o fator determinante deste comportamento diferencial, já que as proporções de caulinita e gibbsita não se relacionam com os dados de adsorção-dessorção.

2.3 Avaliação da disponibilidade de fósforo

2.3.1 Extratores de fósforo do solo

Um dos grandes desafios da fertilidade do solo continua sendo a busca de recursos analíticos ideais, padronizados, de determinação de P, o que reflete a complexidade do nutriente no solo. Neste sentido, um extrator ideal seria aquele que, em contato com as amostras de solo, melhor simulasse o processo de absorção radicular do nutriente (Raij, 1991).

No Brasil, o extrator Mehlich-1, utilizado em grande parte dos laboratórios de análise de solo, consiste numa mistura de dois ácidos fortes diluídos, HCl 0,05 mol.L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol.L⁻¹. Sua ação ocorre pela solubilização dos fosfatos de Ca, Al e Fe, respectivamente, pelos íons H⁺ liberados da mistura quando em contato com o solo. Neste processo, os cátions H⁺ protonam o P e os ânions Cl⁻ e SO₄⁻² trocam-se com os ânions PO₄⁻³ ligados a Ca, Al e Fe (Bahia Filho, 1982). Este extrator é recomendado para solos com baixos valores de CTC (capacidade de troca de cátions), altamente intemperizados e que apresentam pouco ou nenhum fosfato de cálcio (Thomas e Peaslee, 1973).

Em solos com altos teores de óxidos de Fe e de argila, os teores de P obtidos pelo extrator Mehlich-1 normalmente são baixos devido à exaustão do extrator (Kamprath e Watson, 1980). A exaustão foi definida por Holford (1980) como o consumo excessivo de íons H⁺ da mistura ácida ou sensibilidade do extrator à capacidade tampão do solo. Por isso, segundo Bahia Filho (1982), para a utilização de seus níveis críticos, necessário se torna separar as amostras de solo por classe de textura.

Embora diversos outros extratores tenham surgido buscando corrigir as imperfeições do Mehlich-1 (Mehlich-3, Bray-1, H_2SO_4 0,25 mol.L⁻¹, Olsen), as principais vantagens que o tornaram o extrator de mais ampla utilização no Brasil são a boa repetibilidade e o baixo custo para uso em laboratórios de rotina. Além disso, os extratos decantam-se facilmente e sua limpidez dispensa a filtragem das suspensões (Raij, 1991).

Como alternativa aos extratores ácidos a Resina sintética de troca iônica vem sendo utilizada em diversos laboratórios de fertilidade do solo, notadamente no Estado de São Paulo. Comercializada na forma de grânulos, sua matriz estrutural constituída por cadeias de poliestireno, ao contrário dos extratores ácidos, evita a destruição química das amostras de solo, além de atuar numa faixa de pH bem próxima da neutralidade, portanto, semelhante às condições ideais ao crescimento das plantas. O processo de extração ocorre em suspensão aquosa de terra e resina, havendo a transferência de P para a mesma em função do equilíbrio existente entre o P lábil e o P em solução. Tendo em vista que a sua capacidade de troca de ânions (CTA) é muito alta, na realidade há uma transferência do P lábil do solo para a resina (Raij et al., 1987; Raij, 1991).

Apesar do método mostrar-se superior a diversos outros métodos de extração de P (Raij, 1991), algumas desvantagens podem ser citadas, sendo que as principais são: o tempo necessário para extração, a complexidade dos processos de separação resina-solo e a dessorção de P da resina.

Para se comparar extratores de um dado nutriente, no caso o P, utilizam-se as correlações entre as respostas de plantas cultivadas ao nutriente e os teores do mesmo no solo: quanto maior o coeficiente de correlação melhor será o extrator ou método de extração. Conforme observações de Fixen e Grove (1990), o método da Resina adapta-se a uma maior variação das condições prevalecentes nos solos, pois o valor mais baixo de coeficiente de correlação encontrado foi

0,69, e o mais alto, 0,98. A princípio, pelo fato desse método não depender de que o P esteja ligado a Ca, Fe ou Al. Quanto ao extrator Mehlich-1, os coeficientes oscilaram de 0,25 a 0,91, sendo o valor mais baixo atribuído ao fato de o extrator ter sido utilizado em amostras contendo grande quantidade de P ligado a Ca. Neste caso, o método superestima os teores de P disponível. Entretanto, outros extratores concebidos como alternativas ao Mehlich-1, como Bray-1 e Olsen, apresentaram coeficientes mínimos de correlação respectivamente iguais a 0,13 e 0,03, bastante inferiores ao do Mehlich-1 (0,25).

2.3.2 Frações fosfatadas e fosfatase em plantas

Ao se avaliar o conteúdo de P na planta deve-se considerar que o valor encontrado pode não estar refletindo a concentração necessária ao metabolismo da mesma em função da presença de formas de reserva causada pela maior ou menor disponibilidade do nutriente no solo (Raij, 1991; Fernandes et al., 1998).

Além do fator solo, as diferenças na absorção de P por espécies e genótipos têm sido atribuídas, entre outras, à diferença na modulação de seus mecanismos morfológicos e fisiológicos, podendo-se citar, entre os últimos, diferenças na retenção e movimentação do nutriente absorvido e sua conseqüente liberação no xilema (Bielecki, 1973; Bielecki e Ferguson, 1983; Vose, 1987; Furtini Neto et al., 1998).

A planta apresenta quatro compartimentos entre os quais o P se movimenta: o apoplasto externo, em contato com a solução do solo, o apoplasto interno em contato com o corpo principal da planta, o citoplasma ou espaço metabólico e o espaço vacuolar ou não metabólico, delimitado pelo tonoplasto (Bielecki e Ferguson, 1983). É de se supor, portanto, que o comportamento diferencial de plantas se deva não só à ocorrência de variações no transporte a

longa distância e aos drenos preferenciais para o P sob condições de estresse, mas também às diferenças no acúmulo e liberação do P a nível vacuolar e na proporção relativa das frações metabólicas do nutriente (Furtini Neto et al., 1998).

Estudos com diversas espécies têm demonstrado que a concentração de P inorgânico (Pi) no citoplasma é regulada pelo seu conteúdo no vacúolo, ocorrendo mudanças no conteúdo de Pi das células, quase exclusivamente no “pool” vacuolar, não havendo alterações significativas no “pool” citoplasmático (P orgânico – Po) (Bieleski, 1973; Chapin et al., 1982; Lee e Ratcliffe, 1983). O P vacuolar (Pi) tem função de reserva e, caso a quantidade de P absorvido seja menor que a sua demanda pela célula, ele retorna ao citoplasma atendendo à exigência metabólica da célula (Bieleski e Ferguson, 1983). Se o ritmo de crescimento for lento e a demanda de P pequena, um aporte elevado do nutriente à planta resultaria em grande acúmulo de Pi vacuolar (Bieleski e Ferguson, 1983).

A dinâmica das frações fosfatadas (Pi, Po e Pts ou P total solúvel em ácido) está relacionada com a atividade de fosfatases. À medida que diminui o fornecimento de P para as plantas, ocorre um aumento da atividade dessas enzimas de modo a converter P vacuolar (Pi) em P citoplasmático (Po) (Bieleski e Ferguson, 1983; Furtini Neto et al., 1998).

Vários trabalhos mostram que a deficiência de P nas plantas leva a um aumento de atividade da fosfatase ácida (Garcia e Ascencio, 1992). Desse modo, tal atividade no tecido vegetal tem sido investigada como resposta da planta à deficiência de P (Ascencio, 1994). Fernandez e Ascencio (1994) concluíram que a fosfatase não é um bom indicador do estresse de P em plantas com deficiência moderada do nutriente relatando queda da atividade em função da idade da planta. O “status” de P foi bem explicado pela atividade da fosfatase em pepino

(Besford, 1978), trigo (Melachlan, 1987), tomate (Besford, 1979), sorgo (Jaramilo, 1996) e cana-de-açúcar (Silva e Basso, 1993).

Percebe-se que há uma relação entre as frações fosfatadas e atividade da fosfatase em plantas e o P disponível no solo. Assim, a providência adotada em estudos de correlação relacionando a concentração disponível de P no solo por determinado extrator com o conteúdo total do nutriente na planta pode não refletir o verdadeiro estado nutricional da planta.

2.4 Reatividade do silício no solo

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, representando cerca de 32% em peso de todo material dos solos (Tisdale et al., 1985), e ocupando, no mundo mineral, a mesma posição de destaque que o carbono no mundo biológico. Embora quimicamente parecido com o carbono, na verdade, as diferenças nas estruturas e propriedades podem ser consideradas como devidas ao maior tamanho do átomo de Si (Joly, 1966).

As principais fontes de Si, que também são material de origem de diversos tipos de solo, incluem os minerais silicatados primários, silicatos secundários de Al e diversas formas de sílica, SiO_2 , tais como quartzo, tridimita, cristobalita, coesita e opala (Lindsay, 1979).

Na fração argila a concentração de Si depende do grau de remoção (lixiviação) de SiO_2 e de bases do perfil após a transformação (intemperismo) dos minerais silicatados de origem. Este é o processo de formação dos solos latossólicos, um material mais rico em argilominerais de baixíssima atividade como a caulinita, e em óxidos de Fe e Al (Resende et al., 1988, 1997).

Há um consenso entre vários pesquisadores (McKeague e Cline, 1963abc; Lindsay, 1979; Oliveira, 1984; Tisdale et al., 1985; Raij, 1991; Baldeon, 1995)

segundo o qual, na faixa de pH 4 a 9, o monômero H_4SiO_4 (ácido silícico) é a forma predominante de sílica na solução do solo, em concentrações variáveis de menos de 1 até mais de 100 $mg.dm^{-3}$ em SiO_2 . Valores altos podem ser encontrados em solos arenosos e valores baixos podem ocorrer em solos tropicais altamente intemperizados. A própria química do Si reforça os argumentos a favor do H_4SiO_4 como a forma de Si solúvel em água presente nos solos (Joly, 1966). Possuidor de geometria tetraédrica como o carbono, o cátion Si^{+4} estabiliza-se com quatro ligações químicas de igual tamanho, sendo comum, por isso, a sua representação na forma $Si(OH)_4$.

Uma característica própria do H_4SiO_4 é a facilidade que parte do Si^{+4} tem de sair do estado de coordenação quatro (tetraédrica) e assumir uma coordenação seis (octaédrica) quando a concentração do monômero na fase líquida do solo ultrapassa 120 $mg SiO_2.dm^{-3}$. O composto hexacoordenado $[H_2OSi(OH)_5]^-$ formado nessas condições é o ponto de partida para a polimerização. A polimerização, que precede a precipitação, é causada pela combinação de unidades de $[H_2OSi(OH)_5]^-$. Haverá precipitação quando combinarem-se polímeros de $[H_2OSi(OH)_5]^-$ com monômeros (solúveis) de H_4SiO_4 (McKeague e Cline, 1963ab; Iler, 1979; Marschner, 1995).

2.5 Adsorção de silício

A adsorção de Si nos solos foi comprovada por Holt e King (1955) que substituíram o Si^{28} da molécula H_4SiO_4 por Si^{31} (radioativo). Assim, à semelhança do que ocorre com o P, o mecanismo controlador da concentração de H_4SiO_4 na fase líquida do solo parece ser governado por reações de adsorção dependentes de pH (Gallez et al., 1977; Lindsay, 1979; Ross e Wang, 1993; Sakagami et al., 1993; Baldeon, 1995). Nesse contexto, os óxidos de Fe,

notadamente os de pior cristalinidade, são os principais responsáveis por essas reações.

Estudando a adsorção de ânions afins, dentre os quais o silicato, pela goethita sintética em envelopes de adsorção, Hingston et al. (1972) postularam tratar-se de um caso de adsorção específica por troca de ligantes. Por essa teoria, a adsorção dá-se através de uma reação em que o ânion a ser adsorvido, H_3SiO_4^- , troca-se por moléculas de H_2O ou OH^- previamente coordenadas ao Fe^{+3} na superfície da goethita. A adsorção foi máxima em pH ~ 9,0, que coincidiu com o pK_1 do H_4SiO_4 , sendo reduzida em pH ácido. A saída do primeiro próton do H_4SiO_4 , segundo os autores, deveu-se ao fato de a energia de adsorção ter sido suficientemente alta a ponto de dissociar o ácido. Entretanto, McKeague e Cline (1963c) constataram apreciável adsorção de H_3SiO_4^- em solos oxidicos de Porto Rico (EUA) em pH 4,8, o que coloca em dúvida até que ponto a adsorção de Si por solos é um fenômeno totalmente dependente das condições de acidez. Afinal, ao contrário do P, o Si permanece solúvel numa extensa faixa de acidez (pH 4 a 9) que engloba os valores de pH de praticamente todos os solos agrícolas.

Obihara e Russel (1972) comprovaram o modelo de adsorção específica proposto por Hingston et al. (1972), estudando o comportamento do H_3SiO_4^- e do H_2PO_4^- em quatro solos altamente fixadores de fosfato. Concluíram que a magnitude da adsorção das duas espécies consideradas foi diretamente proporcional à adsorção máxima, à energia de ligação e à atividade de cada ânion em solução.

Com base nos relatos sobre a química do Si apresentados nos itens 2.4 e 2.5 é razoável admitir que o elemento encontra-se desigualmente distribuído em cinco compartimentos no solo: na forma de minerais (Si mineral) cujo teor dependerá do grau de intemperismo do solo; solúvel em água como ácido silícico (Si solúvel); polimerizado em moléculas complexas hexacoordenadas (Si

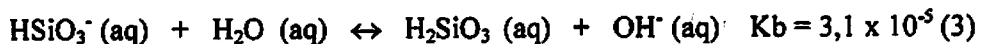
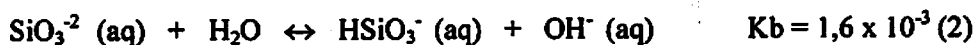
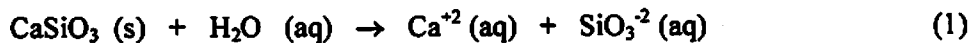
polimerizado); adsorvido como H_3SiO_4^- às superfícies oxídicas da fração argila (Si adsorvido) e precipitado, dependendo da concentração de silício em solução (Si amorfo).

2.6 Competição entre Si e P no solo

São bastante conhecidas e relatadas em solos a capacidade das superfícies hidroxiladas dos óxidos de Fe e Al da fração argila de adsorver Si (Holt e King, 1955; Jones e Handreck, 1967), a relação entre Si solúvel em água e o P disponível (Birch, 1953), e as correlações entre o Si adicionado como silicato, P disponível e P acumulado em plantas (Fisher, 1929).

Uma prática que favorece o aproveitamento do P em solos ácidos é o emprego de silicatos, caso do silicato de cálcio (CaSiO_3) contido nas escórias de siderurgia (18 a 21%) ou do silicato de magnésio (MgSiO_3) presente em fontes comerciais como o termofosfato magnésiano. Esses sais reduzem a fixação e aumentam a disponibilidade de P (Sanchez e Uehara, 1980). Como o ânion silicato é quimicamente adsorvido haveria, a princípio, uma competição entre Si e P pelos mesmos sítios de adsorção. Assim, a correção de acidez do solo com silicatos, além de elevar o pH, poderia disponibilizar o P pelo efeito adicional de deslocar o P adsorvido para a solução (Volkweiss e Raij, 1977).

O poder de neutralização (PN) do CaSiO_3 equivale geralmente a 80% do PN dos calcários (Silva, 1971). Sua ação alcalinizante se deve às seguintes reações, muito semelhantes às do calcário (Vale et al., 1993):



A reação (1) caracteriza a dissociação comum a qualquer substância iônica em presença de água. Em (2) e (3) os ânions silicatos atuam como bases de Bronsted-Lowry capturando prótons H^+ (acidez) dissolvidos na água do solo. A base SiO_3^{2-} é fraca ($K_b = 1,6 \times 10^{-3}$), entretanto, sua capacidade de receber H^+ é maior que a da base CO_3^{2-} ($K_b = 2,2 \times 10^{-4}$), resultante da dissociação do calcário (Mahan, 1977; Vale et al., 1993). O destino dos cátions Ca^{+2} da reação (1) é o complexo sortivo do solo onde deslocam o Al^{+3} para a fase aquosa. Etapas sucessivas de hidrólise resultarão em sua precipitação como $Al(OH)_3$ à semelhança do que ocorre quando se utiliza calcários.

A diferença marcante do modo de ação do $CaSiO_3$ em relação aos carbonatos inicia-se a partir da reação (3), e se refere ao composto H_2SiO_3 . Há evidências (Joly, 1966, Lindsay, 1979) de que a espécie H_2SiO_3 não se estabiliza como tal no solo, tendendo a combinar-se com uma molécula de água para se transformar em ácido monossilícico, H_4SiO_4 , que é a forma de sílica solúvel nos solos na faixa de pH 4 a 9.

Concluída a ação alcalinizante do $CaSiO_3$, o H_4SiO_4 residual, após sofrer desprotonação transformando-se em $H_3SiO_4^-$ (Hingston et al., 1972; Obihara e Russel, 1972), adsorve-se aos óxidos de Fe e Al da fração argila, impedindo ou dificultando a adsorção de P que, desta maneira, torna-se mais disponível em solução. Esta é a principal forma de competição entre Si e P assumida pelos pesquisadores do tema nos últimos 20 anos. O trabalho de referência citado por todos os estudiosos da interação Si-P foi desenvolvido por Roy et al. (1971). Segundo estes autores, a aplicação de $CaSiO_3$ em solos ácidos do Havai (EUA) cultivados com cana-de-açúcar, reduziu a quantidade de fertilizante fosfatado necessária para manter $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$ de P em solução. O decréscimo na adsorção de P variou de 9 a 47%. A maior percentagem de diminuição ocorreu em solos com maiores teores de caulinita e a menor, no material mais intemperizado, rico em

óxidos de Fe e Al. O efeito residual do CaSiO_3 na diminuição da quantidade de fertilizante fosfatado foi mais acentuado em pH 5,5 do que em pH 6,2. O requerimento de fosfato foi reduzido em 500 kg P.ha^{-1} em pH 5,5 e 75 kg P.ha^{-1} em pH 6,2.

Experimento conduzido por Smyth e Sanchez (1980) nos EUA com amostras de um Latossolo caulínítico do cerrado brasileiro (pH 4,8) incubadas com CaCO_3 e CaSiO_3 mostrou redução na retenção de P e aumento na capacidade de troca de cátions (CTC). Decorridos seis meses de incubação constatou-se que nos tratamentos com CaCO_3 e CaSiO_3 houve redução de 18% e 24% na adsorção de P, respectivamente. Durante o trabalho, o solo foi cultivado com arroz em casa-de-vegetação.

Baldeon (1995) estudou, em experimentos com arroz conduzidos em casa-de-vegetação a ação alcalinizante e a competição Si x P na eficiência do termofosfato magnésiano (MgSiO_3). Foram utilizados dois solos, Terra Roxa Estruturada e Latossolo Roxo, e o autor concluiu que o termofosfato foi superior ao super triplo com e sem corretivo quanto à produção de matéria seca e quantidade de P acumulado na matéria seca da parte aérea das plantas. Este resultado foi atribuído à competição Si x P combinada com a ação alcalinizante do termofosfato.

Percebe-se que o CaSiO_3 foi aplicado ao solo antes da fertilização fosfatada, à semelhança da prática da calagem. Portanto, a maior disponibilidade de P pode ter ocorrido mais em função da influência do aumento de cargas negativas decorrentes do incremento do pH do que pela competição Si x P por sítios de adsorção. Além disso, os referidos trabalhos utilizaram gramíneas como plantas indicadoras, estas acumuladoras de Si em seus tecidos (Marschner, 1995). Neste caso, não se pode descartar também o papel nutricional do Si

mascarando ou confundindo-se na planta com os benefícios do P que foi desorvido do solo pelo Si.

Uma outra forma de competição Si x P ocorre quando se aplica o CaSiO_3 ao solo numa etapa posterior à fosfatagem, em concentrações suficientemente elevadas para superar a energia de ligação do P às superfícies oxídicas. Neste caso, segundo constatações de Obihara e Russel (1972), Oliveira (1984) e Leite (1997), o H_3SiO_4^- pode deslocar o H_2PO_4^- previamente adsorvido (troca de ligantes) aumentando a sua disponibilidade em solução.

Trabalhando com amostras de dois Latossolos de Minas Gerais (Latossolo Roxo - LR e Latossolo Vermelho-Escuro - LE) em condições de laboratório, Oliveira (1984) constatou deslocamentos (dessorção) recíprocos de Si e P tendo sido verificados percentualmente maiores deslocamentos no LE. O Si foi mais facilmente deslocado pelo P do que este pelo Si, segunda a autora, devido a uma maior energia de retenção do P aos sítios de adsorção, confirmando observações anteriores de Hingston et al. (1972).

Leite (1997) pesquisou a interação Si-P em Latossolo Roxo sob condições de laboratório e casa-de-vegetação (sorgo). Em laboratório, à semelhança de Oliveira (1984), constatou deslocamentos de P por Si e vice-versa, chegando a sugerir a inclusão de fontes solúveis de Si em programas de adubação com P em Latossolos, especialmente aqueles com baixos teores de Si disponível (solúvel).

Esta última forma de competição, também confirmada por pesquisadores da Universidade do Havá (EUA) (Roy et al., 1971; Silva, 1971), embora pareça inviável como prática agrícola, tem a grande vantagem de permitir isolar o “efeito competição Si x P” do “efeito pH”, desde que este último permaneça inalterado durante a fase experimental e que a planta indicadora empregada não seja

acumuladora de Si. O procedimento parece também facilitar a quantificação do “efeito competição”.

2.7 O papel do Si nas plantas

As diferentes espécies de plantas variam grandemente em sua capacidade de acumular Si nos tecidos, podendo, em função dos percentuais de SiO_2 na matéria seca, ser divididas em: (a) acumuladoras, que incluem muitas gramíneas como o arroz, as quais contêm de 10% a 15% de SiO_2 ; (b) intermediárias, com teores de SiO_2 variando de 1% a 5% (cereais, cana-de-açúcar, poucas dicotiledôneas); (c) não acumuladoras ($< 0,5\% \text{SiO}_2$), incluindo a maioria das dicotiledôneas, como as leguminosas e muitas espécies arbóreas (Takahashi e Miyake, 1977; Faquin, 1994; Marschner, 1995).

O transporte de Si na forma monomérica H_4SiO_4 até as raízes depende de sua concentração na solução do solo e da espécie de planta. Em baixas concentrações é reduzido o transporte por fluxo de massa, que passa a ser significativo em se tratando de plantas acumuladoras cultivadas em solos com elevados teores do elemento (Marschner, 1995). O processo de absorção pelas plantas, também na forma H_4SiO_4 , parece ser ativo, pois requer energia metabólica e é sensível a inibidores metabólicos e à temperatura (Faquin, 1994).

O Si é transportado no xilema como H_4SiO_4 e a sua distribuição na planta está relacionada com a taxa transpiratória das diferentes partes da planta. Esta distribuição depende muito da espécie: é uniforme nas plantas que acumulam pouco Si e nas acumuladoras, como o arroz, 90% do elemento encontra-se na parte aérea (Malavolta, 1980; Mengel e Kirkby, 1987; Faquin, 1994). Plantas dicotiledôneas (não acumuladoras), segundo Jones e Handreck (1967), possuem mecanismo que evita a absorção de quantidades elevadas de Si. O acúmulo pode

ocorrer em dois compartimentos da planta: nas raízes, provocando espessamento da endoderme ou como polímeros, pela combinação de diversas unidades de H_4SiO_4 na endoderme de folhas velhas. Não se conhecem referências sobre a redistribuição do elemento em plantas, sejam elas acumuladoras, intermediárias ou não acumuladoras (Mengel e Kirkby, 1987; Marschner, 1995).

O Si geralmente não é considerado parte do grupo de elementos essenciais para o crescimento das plantas. No entanto, o crescimento e a produtividade de muitas gramíneas como arroz, cana-de-açúcar, sorgo, milheto, aveia, trigo, milho, grama bermuda, etc, têm mostrado incrementos com o aumento da disponibilidade de Si para as plantas, notadamente aquelas consideradas acumuladoras do elemento em seus tecidos (Korndörfer e Datnoff, 1995; Marschner, 1995).

A aplicação de silicatos finamente moídos (escórias) aos solos cultivados com gramíneas é prática comercial no Haváí (EUA) e em outras partes do mundo visando ao aumento da produtividade (Tisdale et al., 1985; Korndörfer e Datnoff, 1995). Os efeitos positivos dos silicatos são normalmente associados ao aumento na disponibilidade de Si (Silva, 1971), elevação do pH do solo (Smyth e Sanchez, 1980), fornecimento de micronutrientes (Silva, 1971), resistência de plantas às doenças (Jones e Handreck, 1967), redução do estresse salino (Match et al., 1986), disposição mais ereta das folhas (Yoshida et al., 1969), resistência ao ataque de pragas (Marschner, 1995), maior disponibilidade (dessorção) de P (Roy et al., 1971) e tolerância à toxidez de Al e Fe no solo (Mengel e Kirkby, 1987). De acordo com os autores citados, os benefícios do Si conferidos às plantas em si, são devidos a sua contribuição para a estruturação da parede celular de raízes e folhas. Portanto, este elemento não tem um papel metabólico definido nas plantas acumuladoras e sua ação, segundo Malavolta (1980) e Baldeon (1995), provoca

[REDACTED]


efeitos indiretos, os quais, em conjunto contribuem para uma maior produtividade.

Alguns trabalhos (Emadian e Newton, 1989; Belanger et al., 1995; Marschner, 1995) parecem esclarecer que o acúmulo excessivo de Si nos tecidos de muitas gramíneas tem implicações metabólicas importantes ainda não relatadas para as plantas não acumuladoras. Assim, na ausência de Si foram constatados: (a) redução na incorporação de fosfatos inorgânicos ao ATP e ADP em cana-de-açúcar; (b) declínio da proporção de lignina e incremento de compostos fenólicos como o ácido caféico em trigo; (c) diminuição da elasticidade celular, atribuída a reações do elemento com pectinas e polifenóis; (d) redução na deposição de celulose e hemicelulose; (f) indução de deficiência de Zn com mecanismo ainda não esclarecido; (g) má formação de folhas e senescência prematura.

Parece razoável admitir portanto, que uma planta acumula muito Si em seus tecidos apenas por necessitar dele em seu metabolismo, enquanto outras, como a maioria das dicotiledôneas (não acumuladoras), são dotadas de um mecanismo para excluí-lo, pois para elas, é provável que o papel metabólico do Si seja diminuto ou até inexistente.

2.8 Determinação do Si disponível no solo

A justificativa para o pouco interesse em pesquisar o Si, apesar de sua ocorrência em altos teores nos solos, deve-se ao fato de ele não ser reconhecido como elemento essencial às plantas. Entretanto, a literatura tem demonstrado o efeito benéfico de sua aplicação no aumento da produção de gramíneas como cana-de-açúcar e arroz (Janfeng e Takahashi, 1990; Anderson et al., 1991).



Tisdale et al. (1985) relataram que Latossolos ácidos do Havaí com concentrações de Si solúvel entre 0,9 e 2,0 mg.L⁻¹ necessitam de suplementação do elemento para garantir boa produção de cana-de-açúcar. Com base em afirmações desta natureza, diversos trabalhos visando desenvolver métodos eficientes de análise do Si no solo têm sido produzidos. Como os teores extraídos variam com o tipo de extrator empregado e com os procedimentos analíticos de extração, torna-se necessário adotar critérios para a escolha de um extrator que possa quantificar o Si disponível às plantas, bem como estabelecer as condições experimentais de extração.

De modo geral, qualquer novo extrator proposto tem a sua eficácia comparada ao extrator água desenvolvido por McKeague e Cline (1963b). A despeito das críticas à água, normais em trabalhos que propõem extractores alternativos, estes têm eficiência inferior ou no máximo igual à da água em termos de quantidades extraídas. A grande vantagem da água, segundo os proponentes do método, é o fato de não afetar o estado natural de adsorção dos solos, além de facilitar o processo de hidrólise do próprio Si o qual, por tratar-se de um cátion tetraédrico, facilmente absorve moléculas de água para formar o ácido monossilícico (H₄SiO₄).

McKeague e Cline (1963b) realizaram um estudo detalhado dos fatores que afetam os valores da sílica solúvel em água (H₄SiO₄). Foi testada por exemplo, a separação dos extratos por centrifugação de 1000G a 20.000G constatando-se que a dissolução foi rápida nos primeiros minutos sendo que em cinco minutos 50% da sílica que era obtida em 10 dias de contato solo-extrator já estava em solução e que o aumento após um ou dois dias de contato era muito pequeno. Portanto, a velocidade de centrifugação não interferiu na quantidade da sílica extraída. A melhor relação água (extrator): solo é de 10:1, para a grande maioria dos solos.

Outros extratores que vêm sendo empregados com relativa eficiência (McKeague e Cline, 1963b; Raji e Camargo, 1973; Coelho et al., 1996) são as soluções $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ e $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$ de NaCl, CaCl_2 e MgSO_4 , tampão pH 4,0 (ácido acético-acetato de sódio) e ácido acético $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$. A maioria utiliza a relação 10:1 para extrator-solo, sendo muito variáveis o tempo de agitação utilizado (raramente cinco minutos, como no caso da água) e as técnicas de separação do extrato. Destes, o mais promissor em relação à água é a solução de CaCl_2 $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$, cujos teores extraídos são aproximadamente 10% inferiores aos da água (McKeague e Cline, 1963b) mas tem a vantagem de permitir a obtenção de extratos límpidos, sem argila dispersa (Raji e Camargo, 1973). Entretanto, um grande inconveniente constatado por Oliveira (1984) é a afinidade entre o Ca^{+2} do extrator e o Si solúvel na solução do solo, provocando precipitação de silicato de cálcio (CaSiO_3), o que provavelmente explica os menores teores do elemento extraídos pelo CaCl_2 $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$ em relação à água.

Dentre os vários aspectos positivos que certamente resultarão das pesquisas que vêm sendo atualmente desenvolvidas em todo mundo visando um melhor entendimento da dinâmica do silício no sistema solo-planta, a definição de um extrator ideal para o elemento no solo destaca-se como de fundamental importância. Essa diretriz engloba necessariamente estudos ainda muito incipientes de correlação e calibração envolvendo o fator planta.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos solos

Amostras de um Latossolo Vermelho-Escuro (LE) fase cerrado e de um Cambissolo (C) fase campo cerrado, originados de rochas pelíticas pobres (Giarola et al., 1997) do município de São Sebastião da Vitória, zona fisiográfica Campos das Vertentes, Minas Gerais, sob pastagem nativa, foram coletadas na camada de 0-20cm de profundidade. Os solos foram escolhidos por apresentarem expressiva representatividade territorial no país (Resende et al., 1997), teores semelhantes de argila, óxidos de ferro “totais” e diferentes teores de caulinita e gibbsita. Seus principais atributos químicos, físicos e mineralógicos são apresentados na Tabela 1.

Os solos, após secagem ao ar, foram passados em peneira de 2 mm, tendo as análises químicas (pH em água, K, Ca, Mg, Al, H + Al, P e carbono orgânico) sido realizadas conforme EMBRAPA (1997). Os teores de óxidos de Fe livres totais foram obtidos por meio de duas extrações sucessivas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fe_2O_3 d) (Mehra e Jackson, 1960) e os teores de óxidos do ataque sulfúrico determinados conforme Vettori (1969) com modificações de EMBRAPA (1997). Obteve-se a mineralogia qualitativa da fração argila por difratometria de raios-X, enquanto gibbsita e caulinita foram quantificadas na argila desferrificada por meio de análise térmica diferencial. A mineralogia dos óxidos de ferro foi analisada na fração argila após concentração dos mesmos com NaOH 5 mol.L⁻¹ (Kämpf e Schwertmann, 1982) sendo a taxa goethita/goethita + hematita quantificada com base nos difratogramas de raios-X. As formas menos cristalinas de Fe foram extraídas pelo oxalato de amônio (Fe_o), segundo

Schwertmann (1973), e a capacidade máxima de adsorção de P (CMAF) estimada conforme Syers et al. (1973).

TABELA 1. Atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos utilizados nos experimentos.

Atributos	Solos	
	LE	C
pH em água	5,0	5,2
P _{Mehlich-1} (mg.dm ⁻³)	1	1
P _{Resina} (mg.dm ⁻³)	2	2
K (mg.dm ⁻³)	32	22
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	0,7	0,5
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	0,2	0,2
Al (cmol _c .dm ⁻³)	0,3	0,7
H + Al (cmol _c .dm ⁻³)	6,3	6,3
S (cmol _c .dm ⁻³)	1,0	0,7
t (cmol _c .dm ⁻³)	1,3	1,4
T (cmol _c .dm ⁻³)	7,6	6,8
m (%)	20	53
V (%)	16	10
Matéria orgânica (g.kg ⁻¹)	34	23
Areia (g.kg ⁻¹)	160	100
Silte (g.kg ⁻¹)	130	220
Argila (g.kg ⁻¹)	710	680
Fe ₂ O ₃ d (g.kg ⁻¹) ^{1/}	100	80
Fe _o (g.kg ⁻¹) ^{2/}	0,17	0,20
SiO ₂ (g.kg ⁻¹) ^{3/}	138	280
Al ₂ O ₃ (g.kg ⁻¹) ^{3/}	320	295
Fe ₂ O ₃ (g.kg ⁻¹) ^{3/}	158	160
TiO ₂ (g.kg ⁻¹) ^{3/}	21	20
P ₂ O ₅ (g.kg ⁻¹) ^{3/}	0,46	0,27
CMAF (mg.kg ⁻¹)	1666	1380
Ct (g.kg ⁻¹)	120	280
Gb (g.kg ⁻¹)	290	77
Gt/Gt + Hm	0,75	0,83
Si solúvel em água (mg.dm ⁻³)	29	17

^{1/}Fe₂O₃d=ferro ditionito; ^{2/}Fe_o=ferro oxalato; ^{3/}óxidos do ataque sulfúrico; Ct=caulinita; Gb=gibbsita; Hm=hematita; Gt=goethita; CMAF=capacidade máxima de adsorção de fósforo.

3.2 Incubações dos solos, instalação e condução dos experimentos

Os experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (MG). A unidade experimental constou de um vaso de plástico com capacidade para 3 dm³, ocupado com 2,7 dm³ de solo passado em peneira de 2 mm de diâmetro. Todos os vasos foram submetidos a três incubações seqüenciais por um período de 30 dias cada uma, sob condição de umidade equivalente a 60% do VTP (Freire et al., 1980), controlada por pesagem diária. A primeira, com a mistura CaCO₃ + MgCO₃ p.a., em quantidades definidas com base em experimento prévio de incubação, objetivou manter em 4:1 a relação Ca:Mg e o pH em torno de 6,0. A segunda (fertilização básica), idêntica para os dois solos, a exceção do P, correspondeu aos seguintes teores de nutrientes na forma de sais p.a. por dm³ de solo: 80 mg de N; 150 mg de K; 40 mg de S; 0,81 mg de B; 3,6 mg de Mn; 1,3 mg de Cu; 1,6 mg de Fe; 0,15 mg de Mo e 5 mg de Zn. O LE recebeu 225 mg.dm⁻³ de P e o C, 150 mg.dm⁻³ de P, doses únicas deduzidas de experimento prévio para determinação da CMAF e suficientes para manter 0,2 mg.L⁻¹ de P em solução (Roy et al., 1971). Os sais p.a. empregados nessa etapa foram NH₄H₂PO₄, KH₂PO₄, (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃ e K₂SO₄, como fontes dos macronutrientes e H₃BO₃, MnSO₄.2H₂O, CuSO₄.5H₂O, FeSO₄.6H₂O, (NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O e ZnSO₄.7H₂O, como fontes dos micronutrientes.

A terceira incubação constou de seis doses de Si obtidas da fonte CaSiO₃ (28,97% de Si e 13,21% de Ca). Para o LE as doses foram: 0, 112, 170, 225, 280 e 340 mg.dm⁻³ de Si e para o C, 0, 75, 112, 150, 187 e 225 mg.dm⁻³ de Si. Em cada solo, uma das doses de Si foi numericamente idêntica à dose de P aplicada na segunda incubação. As demais corresponderam, no seu extremo inferior, a 50% da dose de P e, no extremo superior, a 1,5 vezes a dose de P.

Como a fonte de Si empregada trouxe o Ca^{+2} como cátion acompanhante, procedeu-se a um nivelamento do mesmo com CaCO_3 p.a. nos tratamentos afins.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado arranjado num fatorial de 6 x 3 com quatro repetições. Os fatores foram constituídos pelas seis doses de Si e pelas três épocas (60, 90 e 120 dias), perfazendo 72 vasos (unidades experimentais) por experimento, totalizando 114 vasos nos dois experimentos. As épocas foram contadas a partir do transplântio de mudas de *Eucalyptus grandis* com quatro pares de folhas (duas mudas por vaso após desbaste) produzidas em areia lavada e originadas de um lote de sementes fornecido pelo Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras. Embora cada solo representasse um experimento, ambos foram conduzidos sob as mesmas condições: bancadas adjacentes igualmente distanciadas e com umidade dos vasos controlada por pesagens diárias (60% do VTP; conforme Freire et al., 1980).

Decorridos 20 dias do transplântio das mudas teve início a adubação nitrogenada de cobertura via líquida (NH_4NO_3 p.a.), correspondendo a um adicional de 85 mg N.dm⁻³ em cinco parcelas crescentes, aplicadas conforme o desenvolvimento das plantas.

3.3 Avaliação dos experimentos

Aos 60, 90 e 120 dias após o transplântio das mudas, as plantas foram colhidas, separadas em parte aérea e sistema radicular, secas em estufa (65-70°C), pesadas e moídas, sendo o P determinado após digestão nitroperclórica, conforme Malavolta et al. (1989), e em seguida convertido para P acumulado (conteúdo) na matéria seca da parte aérea. Os teores de P disponível nos solos foram determinados pelo extrator Mehlich-1, conforme EMBRAPA (1997) e pela

Resina trocadora de íons, de acordo com Raji et al. (1987). Uma “terça parte” de cada experimento (24 vasos) foi eliminada em cada época de avaliação.

3.3.1 Dosagem de silício no solo e nas plantas

Procedeu-se a análise de Si nos tecidos vegetais segundo método proposto por Gallo e Furlani (1978), envolvendo a sua extração três etapas: (a) incineração do material a 500°C por 30 minutos em cadinho de níquel; (b) dissolução do SiO₂ com solução de NaOH a 10% e novo aquecimento nas mesmas condições por 20 minutos; (c) dissolução do silicato de sódio (Na₂SiO₃) formado com água destilada no próprio cadinho. O extrato final foi obtido transferindo-se alíquotas variáveis de 1 a 5 mL dos cadinhos para recipientes plásticos com volume final completado com água destilada para 50 mL. A dosagem de Si foi feita por leituras colorimétricas (810 nm) em alíquotas de 50 mL, contendo, além do extrato, soluções de H₂SO₄, molibdato de amônio, ácido oxálico e ácido ascórbico, tendo os teores de Si sido calculados com base em curva padrão preparada com Na₂SiO₃ padrão primário, sendo em seguida corrigidos para Si acumulado na matéria seca da parte aérea (Gallo e Furlani, 1978).

A determinação do Si solúvel nos solos foi executada conforme método proposto por McKeague e Cline (1963b). A extração do elemento compreendeu a agitação de 10 cm³ de TFSA (terra fina seca ao ar) com 100 mL de água destilada por 5 minutos em frascos plásticos, seguida de repouso por 10 horas e separação da suspensão de solo por filtração. A dosagem foi feita por leituras colorimétricas (810 nm) em alíquotas de 100 mL contendo, além do extrato, soluções de ácido tartárico, sulfo-molibídica e de ácido ascórbico. Os teores de Si solúvel em água foram calculados com base em curva padrão preparada com silicato de sódio (Na₂SiO₃) padrão primário.

3.3.2 Frações fosfatadas em plantas

Aos 60, 90 e 120 dias após o transplântio das mudas foram coletadas em cada vaso, aproximadamente 0,5 g de folhas apicais fisiologicamente maduras, sendo as amostras acondicionadas em ácido perclórico 0,2 mol.L⁻¹ e armazenadas em freezer para posterior determinação dos teores de P solúvel em ácido (Pi), P total (Pts) e, por diferença, o teor de P orgânico (Po) conforme método descrito por Smille e Krotkov (1960) e Hogue et al. (1970) modificado por Martinez (1992) e Furtini Neto et al. (1998) (Figura 1).

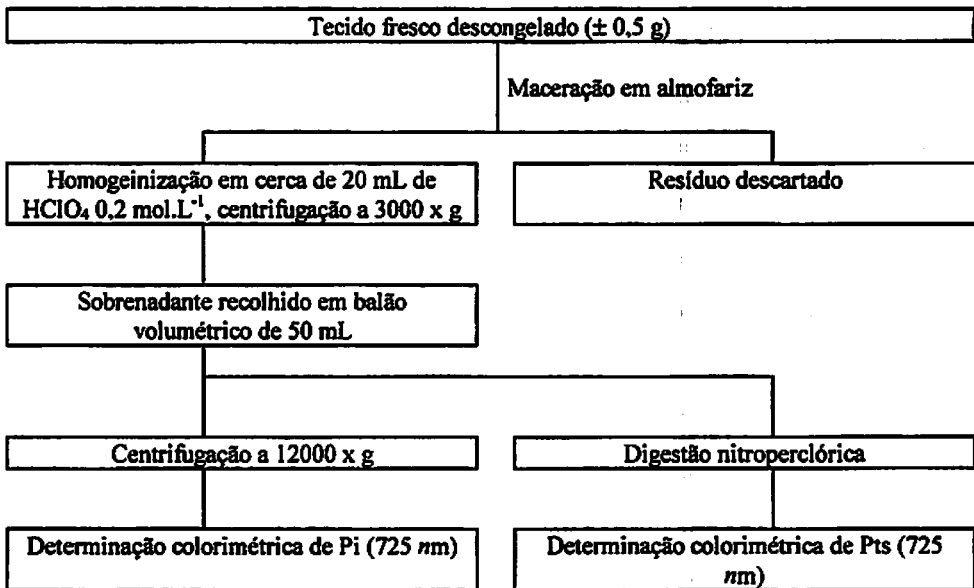


FIGURA 1. Fluxograma do método empregado no fracionamento de P (Smille e Krotkov, 1960 e Hogue et al., 1970, modificado por Martinez, 1992 e Furtini Neto et al., 1998)

3.3.3 Atividade “in vitro” da fosfatase ácida

Aos 60, 90 e 120 dias após o transplântio das mudas coletaram-se em cada vaso, aproximadamente 0,2 g de folhas apicais fisiologicamente maduras, sendo as amostras acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em freezer para posterior determinação da atividade da fosfatase ácida, segundo método descrito por Santos (1985).

As folhas foram maceradas em almofariz na presença de polivinil pirrolidona a 2% e ácido ascórbico. Após a adição de 10 mL de solução tampão de citrato 0.1 mol.L⁻¹, o material foi recolhido em tubos de ensaio e centrifugado a 1000 x g por 15 minutos numa temperatura de 4°C, sendo o resíduo descartado e a fase líquida recolhida em frascos de vidro e armazenada em freezer. A atividade da fosfatase ácida foi determinada em pH 6,5 (pH ótimo da enzima), utilizando como substrato uma solução de paranitrofenolfosfato 8 mmol.L⁻¹. Realizaram-se diversas determinações no mesmo tratamento experimental sendo que, em cada uma delas, a mistura de reação foi incubada a 30°C por quatro diferentes períodos de tempo. Controles sem enzima (branco de substrato) e sem substrato (branco de enzima) foram incubados do mesmo modo que os tubos experimentais. Após leitura colorimétrica, a atividade calculada foi expressa em μ mol de substrato hidrolizado por minuto por grama de tecido fresco (mU = miliunidade).

3.4 Tratamento estatístico

Considerando as mesmas condições de condução do trabalho, os experimentos foram analisados em conjunto aproveitando-se o mesmo resíduo. Na análise de variância, os graus de liberdade para as fontes de variação foram distribuídos conforme a Tabela 2.

TABELA 2. Esquema da análise de variância dos dados experimentais.

Fonte de variação	GL
Solos	1
Épocas	2
Épocas x solos	2
Doses de silício (solos)	10
Épocas x doses de silício (solos)	20
Resíduo	108
Total	143

Para cada solo foram ajustados modelos de equações de regressão múltipla (superfícies de resposta), nas quais, as variáveis produção de matéria seca da parte aérea, conteúdos de P e Si na matéria seca da parte aérea, teores de Si nos solos, teores de Pi e Po e atividade da fosfatase em folhas apicais das plantas foram grafadas em função das seis doses de Si aplicadas nos solos e das épocas de monitoramento experimental. O detalhamento da análise de variância encontra-se no “Anexo”.

Apesar do fator época apresentar apenas três níveis em relação ao fator dose, que teve seis níveis, totalizando 18 combinações dentro de cada solo, optou-se pelo modelo de equações de regressão múltipla (superfícies de resposta). Há relatos de estudos desta natureza em experimentos com fatores apresentando apenas três níveis (fatorial 3 x 3) (Gomes, 1987; Alvarez, 1994). Além disso, embora o efeito do fator época tenha mostrado grande influência no comportamento das variáveis estudadas, sua interação com o fator dose foi melhor visualizada e/ou separada do fator dose através do modelo das superfícies de resposta.

As épocas de avaliação (60, 90 e 120 dias), da mesma maneira que as doses, constituíram níveis de um fator quantitativo (variáveis independentes). Em cada época, as determinações foram feitas eliminando-se os vasos referentes às

repetições das doses de Si. O resumo da análise de variância extraído do “Anexo”, em que se testou o ajuste dos modelos de equações de regressão (superfícies de resposta) encontra-se na Tabela 2a, em que p é o número de parâmetros dos modelos que melhor ajuste apresentaram no estudo das variáveis.

TABELA 2a. Desdobramento da análise de variância considerando o modelo de equações de regressão (superfícies de resposta) para o Latossolo Vermelho-Escuro (LE) e o Cambissolo (C).

Fonte de variação	GL
Solos	1
Épocas x doses de silício (LE)	(17)
Regressão	p
Desvio de regressão	$17 - p$
Épocas x doses de silício (C)	(17)
Regressão	p
Desvio de regressão	$17 - p$
Resíduo	108
Total	143

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Atributos dos solos após a aplicação do silício

Os resultados da análise química realizada após concluídas as três incubações (Tabela 3) revelam o nivelamento a que foram submetidos todos os atributos do complexo sortivo, a exceção do silício. Este, em sua forma solúvel em água (H_4SiO_4), aumenta linearmente com as doses aplicadas em cada solo.

4.2 Matéria seca da parte aérea (MSPA)

Os dados de produção de MSPA de plantas cultivadas no LE e no C foram dispostos na Tabela 4. Ajustando-se equações de regressão para valores estimados desta variável (eixos verticais das Figuras 2 e 3) observam-se os efeitos interativos entre as doses de Si nos solos e as épocas de avaliação na produção de MSPA.

A produção estimada da MSPA de plantas cultivadas no LE e no C (Figuras 2 e 3) cresce respondendo a incrementos lineares das doses de Si aplicadas nos solos e das épocas de avaliação. Ao contrário do LE, no C a idêntica significância dos coeficientes de doses e épocas (1%) permite assumir que, neste solo, estatisticamente, os dois fatores não diferiram entre si quanto a importância de influenciar a produção da MSPA. Da mesma forma, no caso do LE, pode-se admitir que há, embora sutil, uma diferença estatística mais favorável à época (1%) que à dose (5%) na produção de MSPA.

TABELA 3. Atributos químicos dos solos após a aplicação dos tratamentos.

Características	Doses de Si aplicadas (mg.dm ⁻³)											
	Latossolo Vermelho Escuro						Cambissolo					
	0	112	170	225	280	340	0	75	112	150	187	225
pH em água	5,7	5,8	5,7	5,7	5,8	5,7	5,4	5,4	5,3	5,4	5,5	5,4
P Mehlich-1 (mg.dm ⁻³)	6	6	6	6	7	7	11	11	11	11	11	11
P Resina (mg.dm ⁻³)	75	79	70	75	75	78	37	35	33	36	36	40
K (mg.dm ⁻³)	156	172	188	190	180	184	168	168	174	184	174	172
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	4,2	4,5	4,7	4,3	4,3	4,2	2,7	2,7	3,0	2,9	2,9	2,9
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	0,8	0,9	0,9	1,3	1,5	1,3	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7
Al (cmol _c .dm ⁻³)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H + Al (cmol _c .dm ⁻³)	2,9	2,9	3,2	3,2	3,2	3,2	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	4,0
S (cmol _c .dm ⁻³)	5,4	5,8	6,1	6,1	6,3	6,0	3,7	3,5	4,0	3,8	4,1	4,0
t (cmol _c .dm ⁻³)	5,4	5,8	6,1	6,1	6,3	6,0	3,7	3,5	4,0	3,8	4,1	4,0
T (cmol _c .dm ⁻³)	8,3	8,7	9,3	9,3	9,5	9,2	7,7	7,5	8,0	7,8	8,6	8,0
m (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V (%)	65	67	66	66	66	65	48	47	50	49	48	50
Mat. Org. (g.kg ⁻¹)	34	37	38	38	40	37	27	28	27	27	26	27
Si sol. água (mg.dm ⁻³)	28	41	48	49	56	63	18	24	27	28	29	34

TABELA 4. Produção de MSPA de *Eucalytus grandis* cultivado no Latossolo e no Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....MSPA no LE (g.vaso ⁻¹).....			
0	10,84	28,60	50,22
112	7,93	34,29	53,28
170	8,21	22,36	54,71
225	9,89	29,76	58,05
280	9,22	28,45	53,25
340	9,31	34,00	56,29
.....MSPA no C (g.vaso ⁻¹).....			
0	3,72	19,32	31,36
75	3,53	16,86	34,63
112	4,00	18,08	33,55
150	4,29	20,38	41,14
187	4,04	23,02	35,37
225	4,21	19,70	36,82

Embora o modelo estatístico empregado induza a inferir que o Si foi capaz de contribuir para a produção de MSPA das plantas, este fato deve ser analisado com cuidado, à luz do papel desempenhado pelo elemento nas plantas. Em primeiro lugar, o Si não é considerado essencial, mas útil aos vegetais, notadamente gramíneas (Marschner, 1995), nas quais admite-se, inclusive, uma função metabólica e, portanto, nutricional do Si, ainda não relatada para a grande maioria das dicotiledôneas (não acumuladoras de Si) (Emadian e Newton, 1989; Belanger et al., 1995; Marschner, 1995), como é o caso do eucalipto. Além disso, o período de condução dos experimentos (120 dias) coincidiu com a época em que o eucalipto absorve P mais intensamente (Novais et al., 1990).

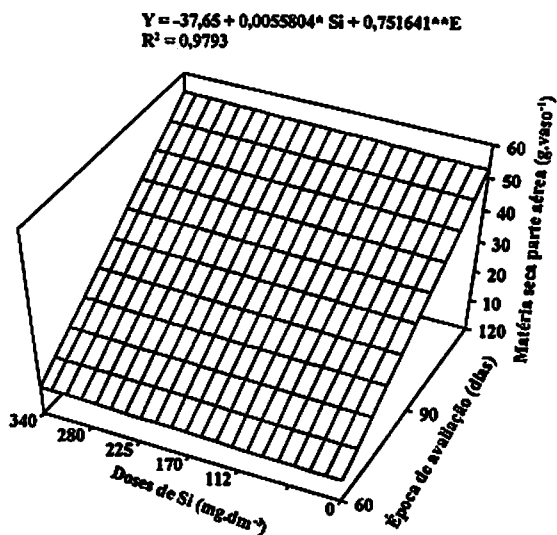


FIGURA 2. Equação de regressão para MSPA de *E. grandis* cultivado no Latossolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

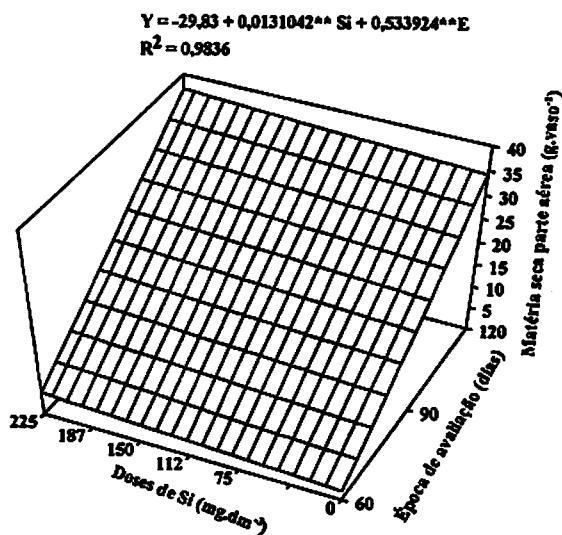


FIGURA 3. Equação de regressão para MSPA de *E. grandis* cultivado no Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

** e *: significativo a 1% e 5% respectivamente pelo teste de t.

4.3 Fósforo na matéria seca da parte aérea

Os conteúdos de P na matéria seca da parte aérea das plantas cultivadas no Latossolo encontram-se na Tabela 5. Ajustando-se uma equação de regressão, considerando doses de Si aplicadas e épocas de monitoramento (Figura 4) observam-se os efeitos interativos dos dois fatores nos conteúdos estimados de P (eixo vertical). A contribuição de cada fator no conteúdo de P pode ser vista nas Figuras 4a e 4b.

Nota-se, na Figura 4, que o P acumulado na MSPA aumenta em função de uma redução quadrática das doses de Si aplicadas e de um crescimento linear das épocas de monitoramento.

Fixando-se a época em 120 dias, na qual ocorreu maior acúmulo de P na planta e variando-se as doses de Si de 0 (tratamento controle) a 340 mg.dm^{-3} obtêm-se valores estimados de P, respectivamente iguais a 36,53; 34,02; 33,89; 34,51; 35,84 e 38,10 mg.vaso^{-1} . Conforme mostrado pelo coeficiente negativo do termo linear da função quadrática, há uma relação inversa entre P acumulado e incrementos de Si no solo até a dose de $170 \text{ mg Si.dm}^{-3}$. Os aumentos de P a partir dessa dose devem-se à contribuição, de pequena magnitude, do termo quadrático (Si^2) do polinômio, notando-se também que o P acumulado no tratamento controle superou todos os demais, a exceção do valor $38,10 \text{ mg.vaso}^{-1}$. Neste caso, o ganho em P foi muito discreto ($1,57 \text{ mg P.vaso}^{-1}$). Derivando-se o ponto de mínimo para essa superfície (ponto de maior concavidade) encontra-se o valor de $150 \text{ mg Si.dm}^{-3}$ que, na referida época, corresponde ao mais baixo valor de P acumulado ($33,85 \text{ mg.vaso}^{-1}$).

TABELA 5. Conteúdos de P na matéria seca da parte aérea (MSPA) de *E. grandis* cultivado no Latossolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Conteúdos de P (mg.vaso ⁻¹).....			
0	18,34	29,96	34,27
112	13,47	27,76	35,50
170	16,60	19,43	36,07
225	19,17	27,08	36,78
280	18,68	28,53	34,50
340	18,97	29,00	39,04

$$Y = 0,50 - 0,0356685^{**} Si + 0,0001185^{**} Si^2 + 0,300259^{**} E$$

$$R^2 = 0,9312$$

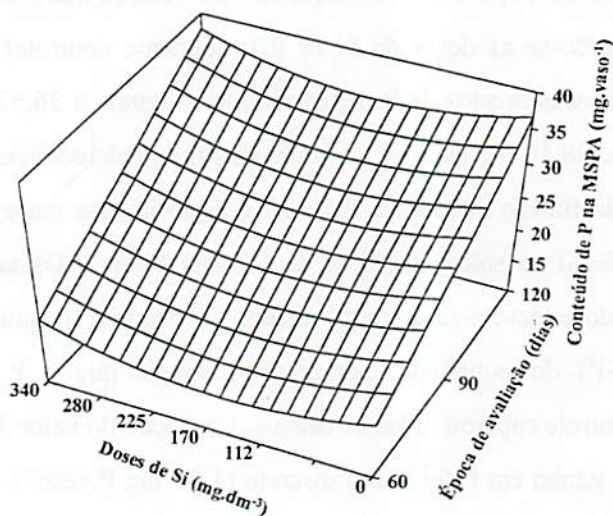


FIGURA 4. Equação de regressão para conteúdo de P na matéria seca da parte aérea de *E. grandis* (eixo vertical) cultivado no Latossolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste de t.

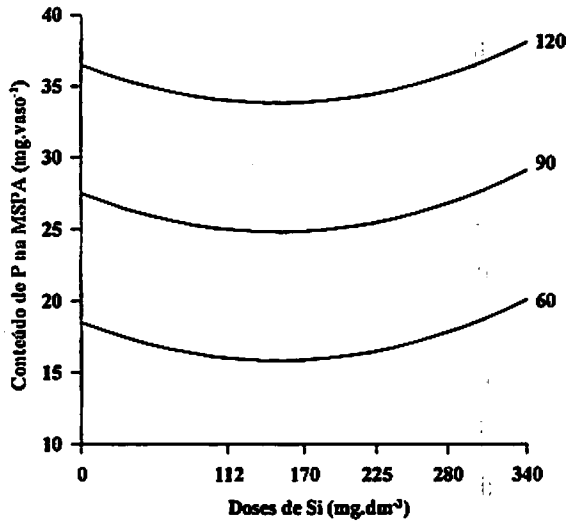


FIGURA 4a. Efeito das doses de Si no acúmulo de P na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Latossolo.

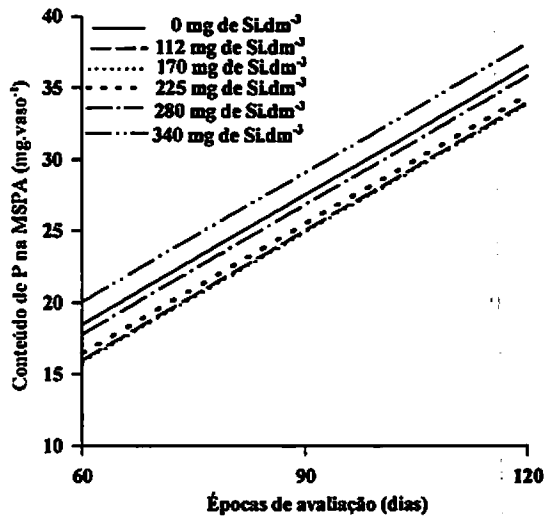


FIGURA 4b. Efeito das épocas de avaliação no acúmulo de P na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Latossolo.

Variando-se as épocas para mesma dose de Si (340 mg.dm^{-3}), os valores de P acumulado foram iguais a 20,08; 29,09 e 38,01 mg.vaso^{-1} , aos 60, 90 e 120 dias, respectivamente. Observa-se que cada 30 dias acrescidos na época corresponderam a incrementos de aproximadamente 10 mg P.vaso^{-1} , atingindo-se em função do tempo e de maneira linear, o mesmo valor estimado obtido com a época fixa e doses variáveis.

Os dados da Tabela 6 referem-se aos conteúdos de P na MSPA de plantas cultivadas no Cambissolo. Ajustando-se uma equação de regressão (Figura 5) considerando doses de Si aplicadas no solo e épocas de avaliação, observa-se a influência combinada desses dois fatores nos conteúdos estimados de P (eixo vertical). Nas Figuras 5a e 5b é possível constatar a influência de cada fator no conteúdo de P.

Percebe-se que o P acumulado na MSPA aumenta, apresentando um crescimento quadrático em função tanto das doses de Si quanto das épocas de avaliação. Derivando-se os pontos de máximo (máxima convexidade) dessa superfície obtêm-se $140 \text{ mg Si.dm}^{-3}$ e 113 dias, correspondendo a $28,03 \text{ mg.vaso}^{-1}$ de P acumulado. Ou seja, o máximo de P acumulado foi $28,03 \text{ mg.vaso}^{-1}$, havendo, até este valor, uma interação crescente e positiva entre doses e épocas. A partir dos pontos de máximo, quaisquer acréscimos tanto de dose quanto de época, influenciados pelo termos quadráticos negativos (Si^2 e E^2) provocam, de modo discreto, reduções no acúmulo de P. Assim, diferentemente do Latossolo, os coeficientes positivos dos termos lineares das duas funções quadráticas, bem como sua idêntica significância (1%) permitem inferir que não há diferença estatística entre os fatores época e dose em sua capacidade de influenciar o acúmulo de P pelas plantas de eucalipto.

TABELA 6. Conteúdo de P na matéria seca da parte aérea (MSPA) de *E. grandis* cultivado no Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Conteúdos de P (mg.vaso ⁻¹).....			
0	9,61	23,40	20,89
75	9,14	23,73	26,63
112	10,80	24,67	22,95
150	13,43	26,30	30,03
187	10,07	21,82	31,51
225	11,06	24,63	23,47

$$Y = -48,77 + 0,0529343^{**} Si - 0,0001891^{**} Si^2 + 1,28609^{**} E - 0,0056576^{**} E^2$$

$$R^2 = 0,9229$$

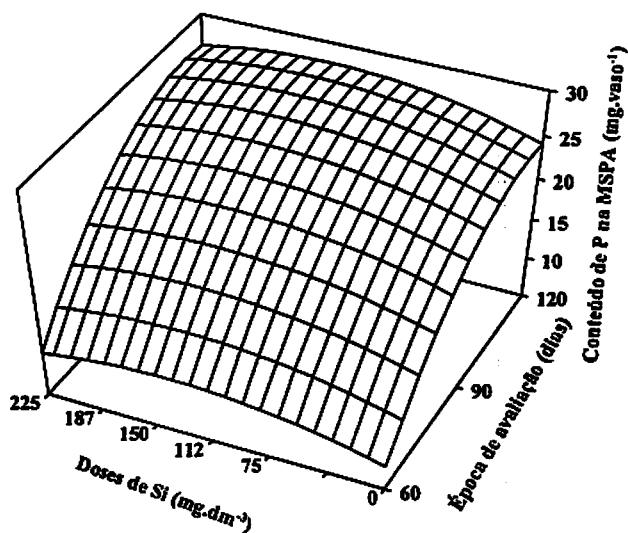


FIGURA 5. Equação de regressão para conteúdo de P na matéria seca da parte aérea de *E. grandis* (eixo vertical) cultivado no Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste de t.

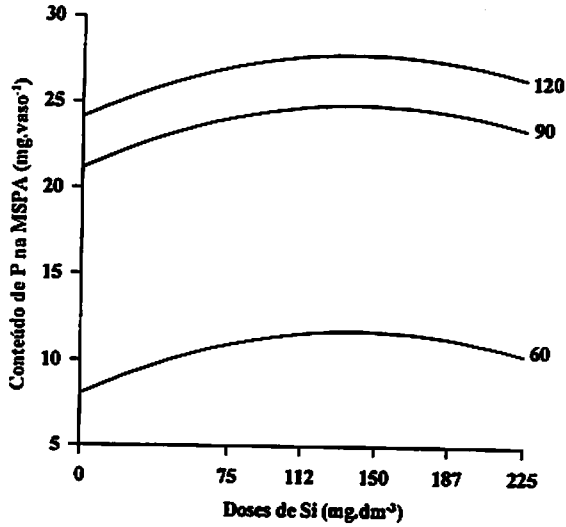


FIGURA 5a. Efeito das doses de Si no acúmulo de P na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Cambissolo.

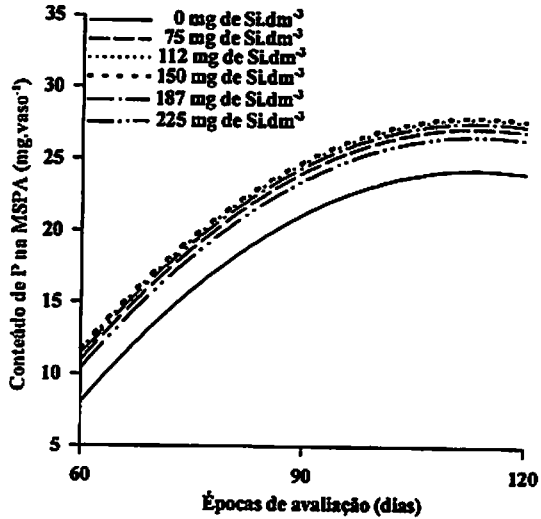


FIGURA 5b. Efeito das épocas de avaliação no acúmulo de P na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Cambissolo.

4.4 Silício solúvel no solo

Os teores de Si solúvel em água no Latossolo e no Cambissolo encontram-se nas Tabelas 7 e 8. Ajustando-se equações de regressão (Figuras 6 e 7), evidencia-se a influência interativa das doses de Si aplicadas e das épocas de avaliação no teor estimado (eixo vertical) de Si solúvel. Os efeitos individualizados dos dois fatores foram apresentados nas Figuras 6a, 6b, 7a e 7b.

Percebe-se, nos dois solos, que o teor de Si solúvel em água (H_4SiO_4) é função de um aumento linear das doses aplicadas do elemento e de uma redução quadrática das épocas de monitoramento. Derivando-se os pontos de mínimo (máxima concavidade) encontram-se 96 e 94,3 dias para Latossolo e Cambissolo, respectivamente, correspondendo às épocas nas quais, para cada dose de Si aplicada, constatarem-se os menores teores de Si solúvel. Dentro de uma mesma época, qualquer aumento de dose implica em crescimento de Si solúvel, entretanto, com o passar do tempo, há uma redução drástica desta variável que volta a incrementar-se a partir dos pontos de mínimo influenciada pelo termo quadrático positivo (E^2) do polinômio.

Como a semelhança de comportamento das duas superfícies evidencia uma redução do Si solúvel com o tempo, parece razoável admitir para o fato quatro explicações possíveis: adsorção às superfícies oxídicas (Gb, Hm, Gt e formas oxídicas menos cristalinas) (Tabela 1), inativação por precipitação, absorção pelas plantas ou combinação destas.

TABELA 7. Teores de Si solúvel em água no Latossolo em função de doses de Si e épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Si solúvel (mg.dm ⁻³).....			
0	33,11	19,12	25,48
112	39,46	20,01	30,68
170	43,45	25,43	33,22
225	48,58	24,84	34,80
280	51,67	27,49	35,40
340	54,37	28,03	40,16

$$Y = 167,89 + 0,0443416^{**} Si - 3,18327^{**} E + 0,0165905^{**} E^2$$

$$R^2 = 0,9739$$

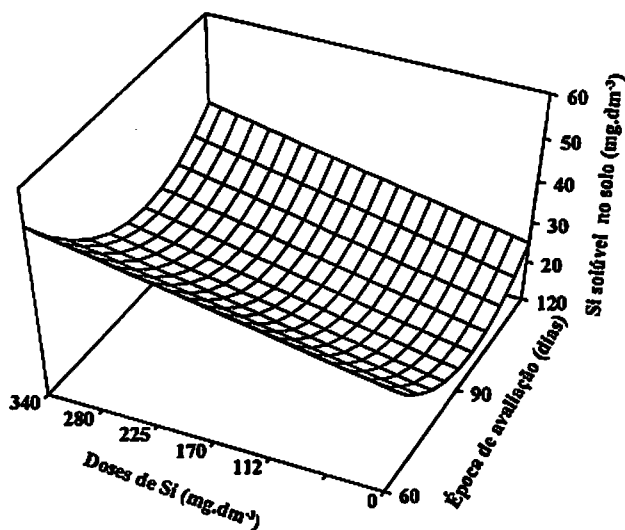


FIGURA 6. Equação de regressão para Si solúvel em água no Latossolo (eixo vertical) em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste de t.

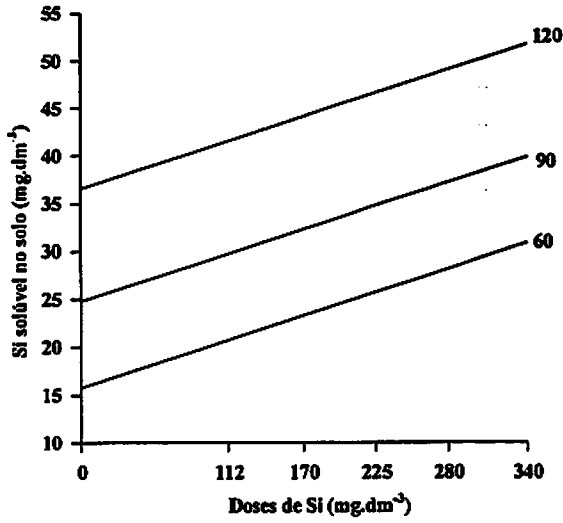


FIGURA 6a. Efeito das doses de Si nos teores de Si solúvel em água no Latossolo

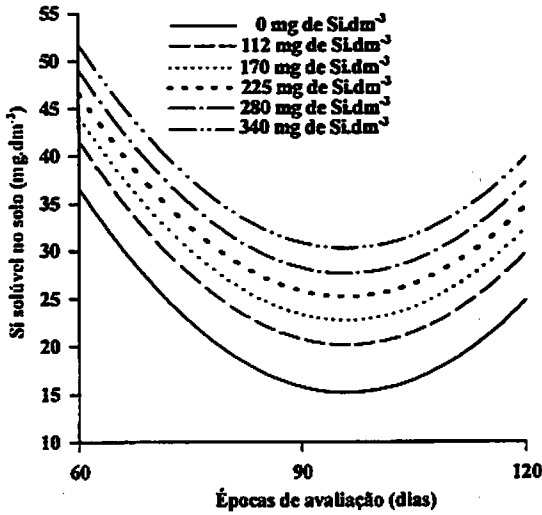


FIGURA 6b. Efeito das épocas de avaliação nos teores de Si solúvel em água no Latossolo

TABELA 8. Teores de Si solúvel em água no Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Si solúvel (mg.dm ⁻³).....			
0	20,01	10,20	16,98
75	23,66	11,56	18,43
112	24,13	12,41	18,98
150	27,83	13,62	20,74
187	27,48	13,45	21,67
225	29,36	14,92	21,97

$$Y = 107,01 + 0,0128821^{**} Si - 2,08209^{**} E + 0,0110415^{**} E^2$$

$$R^2 = 0,9749$$

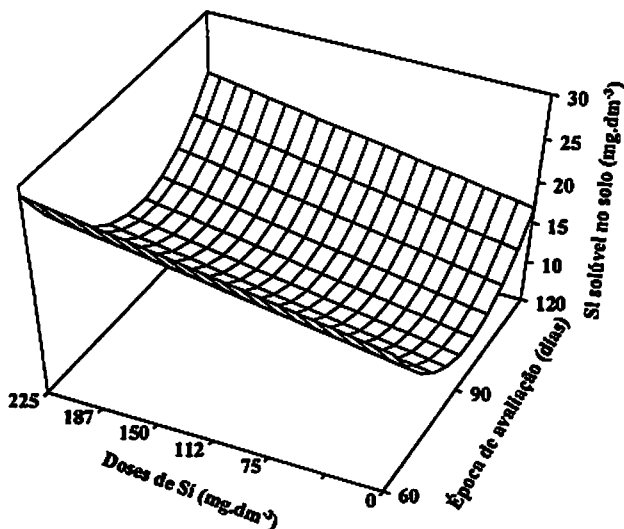


FIGURA 7. Equação de regressão para Si solúvel em água no Cambissolo (eixo vertical) em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste de t.

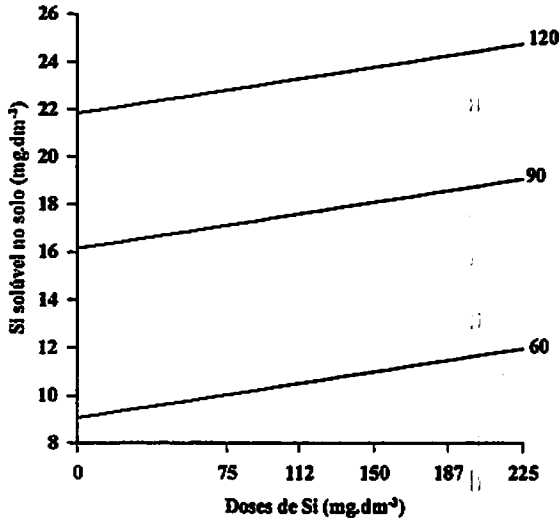


FIGURA 7a. Efeito das doses de Si nos teores de Si solúvel em água no Cambissolo

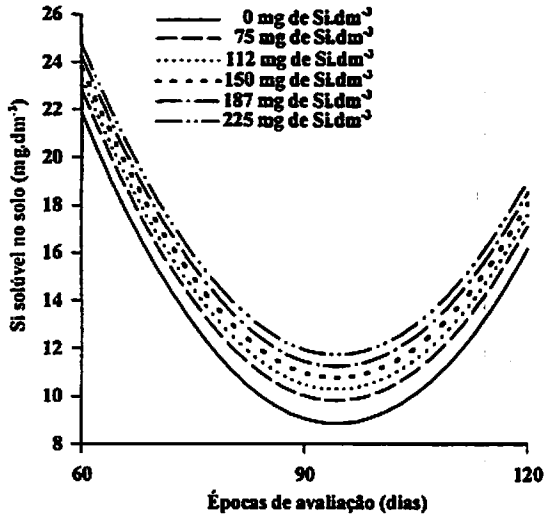


FIGURA 7b. Efeito das épocas de avaliação nos teores de Si solúvel em água no Cambissolo

4.5 Conteúdo de silício na MSPA

Os dados de acúmulo de Si na parte aérea das plantas cultivadas no Latossolo e no Cambissolo encontram-se nas Tabelas 9 e 10. Ajustando-se equações de regressão, considerando doses de Si aplicadas nos solos e épocas de avaliação (Figuras 8 e 9), destacam-se os efeitos interativos dos dois fatores nos conteúdos estimados de Si (eixos verticais). A contribuição de cada fator no acúmulo de Si pode ser vista nas Figuras 8a, 8b, 9a e 9b.

Nas plantas cultivadas no Latossolo, o conteúdo de Si é função de um crescimento linear das doses e de uma redução quadrática das épocas (Figura 8). Derivando o ponto de mínimo desta superfície (ponto de maior concavidade), são encontrados 98 dias para época que correspondem, em Si acumulado, a 10,42 mg.vaso⁻¹, considerando a dose máxima aplicada (340 mg.dm⁻³). Portanto, à medida em que o tempo passa, há uma redução no conteúdo de Si, atingindo um mínimo aos 98 dias, voltando a incrementar-se a partir daí influenciado pelo termo quadrático positivo do polinômio (E^2). Dentro de uma mesma época, qualquer aumento de dose no solo resulta em resposta positiva de Si acumulado. Nota-se, portanto, que, embora interativo com a época, o fator 'dose' explica de maneira mais clara o conteúdo de Si.

Quanto ao Cambissolo, percebe-se que o Si acumulado (Figura 9) é função de um incremento linear das doses e quadrático das épocas. Derivando o ponto de máximo desta superfície encontram-se 97,9 dias para época, que correspondem, em Si acumulado, a 8,12 mg.vaso⁻¹, considerando a máxima dose aplicada (225 mg Si.dm⁻³). Neste caso, a interação doses x épocas influenciou linear e positivamente a resposta do Si acumulado até o ponto de máximo, a partir do qual decresceu, influenciada pelo termo quadrático (E^2) do polinômio.

TABELA 9. Conteúdo de Si em *E. grandis* cultivado no Latossolo em função de doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Conteúdo de Si (mg.vaso ⁻¹).....			
0	8,49	5,11	7,61
112	7,81	6,62	9,73
170	9,11	5,71	9,35
225	12,04	8,22	10,68
280	12,32	8,66	11,21
340	14,66	11,47	10,76

$$Y = 30,21 + 0,0177555^{**} Si - 0,561131^{**} E + 0,0030488^{**} E^2$$

$$R^2 = 0,7934$$

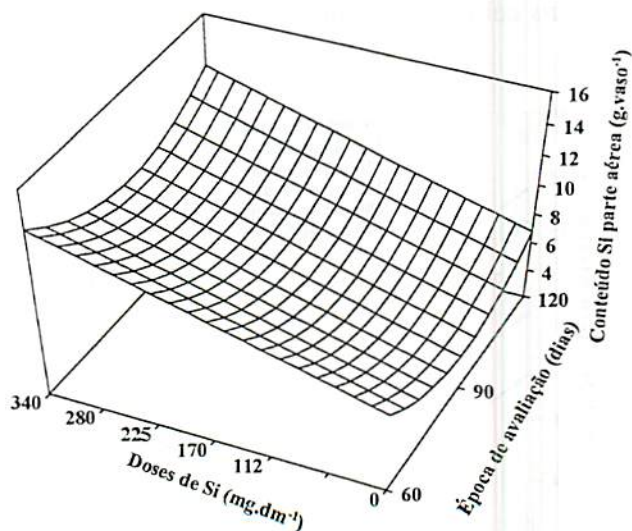


FIGURA 8. Equação de regressão para Si acumulado na parte aérea de plantas (eixo vertical) cultivadas no Latossolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste de t.

FIGURA 8a. Efeito das doses de Si no conteúdo de Si na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Latossolo

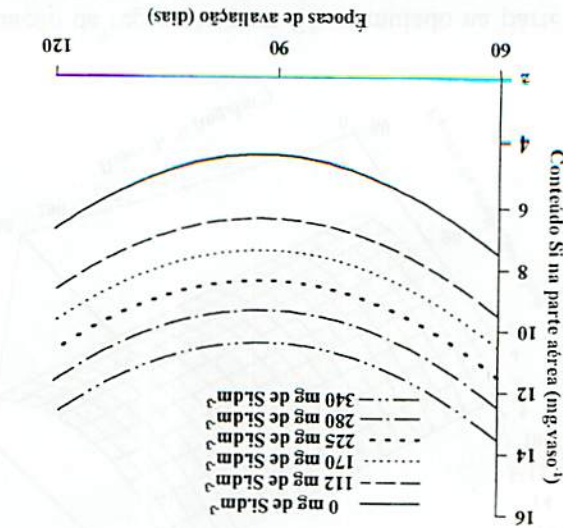


FIGURA 8b. Efeito das épocas da avaliação no conteúdo de Si na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Latossolo

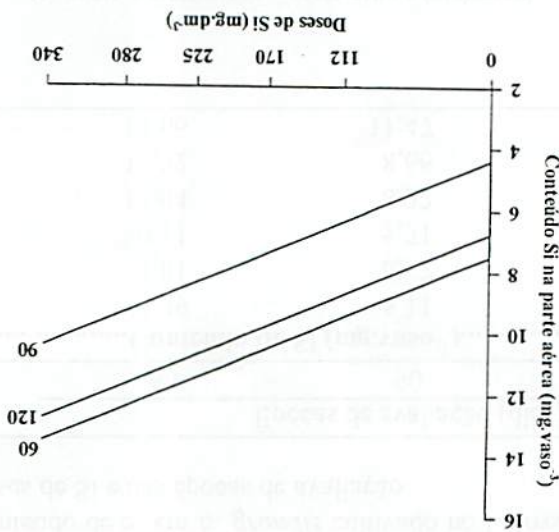


TABELA 10. Conteúdo de Si em *E. grandis* cultivado em Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Conteúdo de Si (mg.vaso ⁻¹).....			
0	2,92	3,40	4,35
75	3,08	4,49	5,26
112	4,40	5,97	5,20
150	5,06	5,66	6,77
187	4,93	8,56	5,91
225	8,12	8,49	6,75

$$Y = -58,70 + 0,0188899^{**} Si + 0,198975^{**} E - 0,0010161^{**} E^2$$

$$R^2 = 0,7863$$

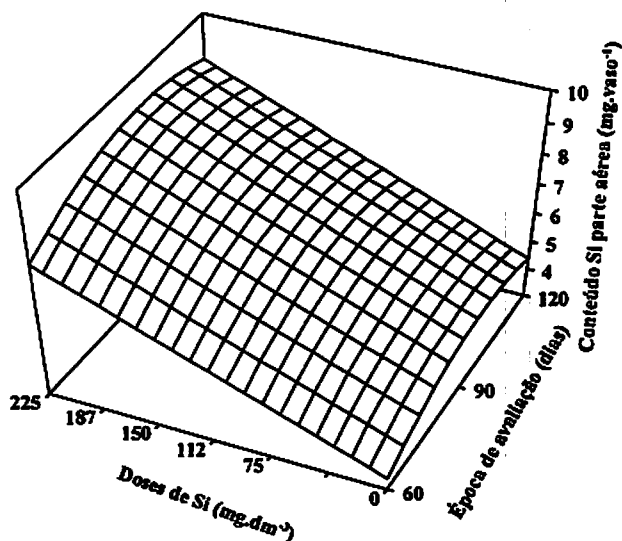


FIGURA 9. Equação de regressão para Si acumulado na parte aérea de plantas (eixo vertical) cultivadas no Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste de t.

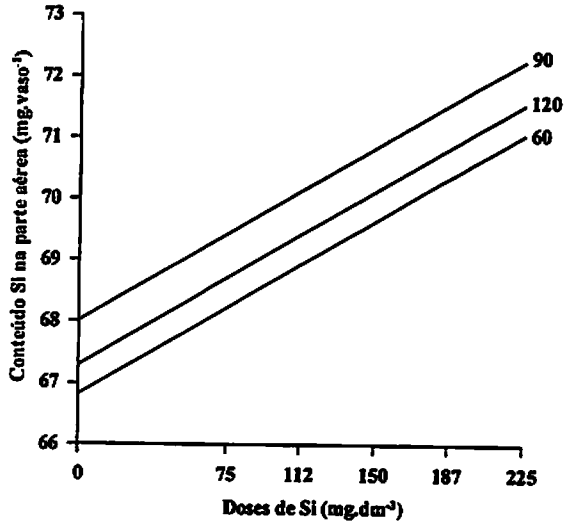


FIGURA 9a. Efeito das doses de Si no conteúdo de Si na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Cambissolo

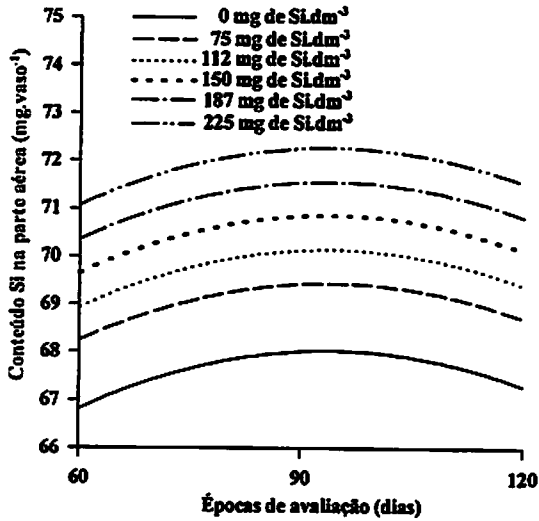


FIGURA 9b. Efeito das épocas de avaliação no conteúdo de Si na parte aérea de *E. grandis* cultivado no Cambissolo

Infere-se que o eucalipto, em pequena escala, responde a incrementos de Si no solo. Entretanto, não se pode afirmar que a redução na concentração do elemento solúvel nos dois solos (Figuras 6 e 7) ocorreu de forma tão evidente devido à absorção do mesmo pelas plantas.

Embora responsivo ao Si, o eucalipto, à semelhança da maioria das dicotiledôneas, não é uma planta acumuladora (Marschner, 1995). Tomando-se como exemplo o maior valor da Tabela 9, $14,66 \text{ mg Si.vaso}^{-1}$ ($31,37 \text{ mg SiO}_2.\text{vaso}^{-1}$), e convertendo-o para percentagem de SiO_2 em 9,31 g de MSPA, obtêm-se 0,34% SiO_2 . De acordo com Takahashi e Miyake (1977) e Marschner (1995), classifica-se como não acumuladora qualquer planta cuja percentagem de SiO_2 na MSPA seja inferior a 0,5%.

O maior acúmulo do elemento em plantas no LE pode ser explicado porque seus teores bem menores de silte (Tabela 1) propiciam menor impedimento físico à penetração do sistema radicular no vaso de cultivo, permitindo maior crescimento de plantas, acompanhado de uma maior absorção de Si, conforme observações durante a condução dos experimentos.

A queda acentuada na concentração de H_4SiO_4 até o ponto de mínimo no Latossolo (Figura 6) pode ser atribuída à precipitação do mesmo, de acordo com estudos de McKeague e Cline (1963ab), Iler (1979) e Marschner (1995). O monômero H_4SiO_4 , forma solúvel de Si no solo, polimeriza-se e em seguida precipita-se quando sua concentração em solução atinge cerca de 120 mg.dm^{-3} em SiO_2 (56 mg.dm^{-3} em Si). Como nas amostras de campo, o LE apresenta $29,24 \text{ mg.dm}^{-3}$ de Si solúvel contra $17,31 \text{ mg.dm}^{-3}$ do Cambissolo (Tabela 1), percebe-se, neste último, que a concentração de H_4SiO_4 é 3,3 vezes inferior a do ponto de saturação. Portanto, diferentemente do Cambissolo, o LE suporta “menos” adições artificiais abruptas de Si, com conseqüente polimerização seguida de precipitação do “excedente” do elemento. Tal fenômeno foi também relatado por

Oliveira (1984) em Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo e, mais recentemente, por Leite (1997) em Latossolo Roxo.

McKeague e Cline (1963a) e Iler (1979) propuseram um modelo químico explicativo da baixa solubilidade do H_4SiO_4 (ou $Si(OH)_4$) em água. Enquanto solúvel, cada cátion Si^{+4} permanece rodeado por quatro ânions OH^- (número de coordenação igual a quatro em arranjo tetraédrico). Entretanto, quando a concentração atinge o ponto de saturação, ocorrem rearranjos moleculares que mudam a coordenação de parte do Si^{+4} de quatro para seis, resultando no aparecimento da espécie $[Si(OH)_5H_2O]^-$ com geometria octaédrica. A polimerização, que precede a precipitação, seria causada pela combinação de unidades de $[Si(OH)_5H_2O]^-$, havendo precipitação quando combinam-se polímeros de $[Si(OH)_5H_2O]^-$ com monômeros (solúveis) de H_4SiO_4 . Por ser metaestável em condições de acidez não elevada, como é o caso dos solos utilizados nesse trabalho após incubação (Tabela 3), o precipitado pode redissolver-se parcialmente, o que explica a subida no teor de H_4SiO_4 no LE a partir do ponto de mínimo da superfície de resposta (Figura 6).

Argumentos pedológicos propostos por Resende et al. (1997) explicam as diferenças nos teores de H_4SiO_4 dos dois solos. Os atributos químicos e mineralógicos pressupõem maior adsorção de silício no LE em comparação ao C, portanto, à medida em que a concentração de Si na solução daquele solo diminuir, haverá maior reposição do mesmo por formas menos lábeis. Por outro lado, no C, há maior fluxo lateral de água, com conseqüente perda de Si (Giarola et al., 1997). Os teores de matéria orgânica encontrados, 34 g.kg^{-1} no LE contra 23 g.kg^{-1} no C (Tabela 1), reflexos das fases de vegetação (cerrado arbóreo-arbustivo no LE e campo cerrado no C), em sua maioria restos de gramíneas (pastagem nativa), plantas acumuladoras de Si (Marschner, 1995), estão em consonância com os dados obtidos.

A diminuição do H_4SiO_4 no Cambissolo até o ponto de mínimo da superfície de resposta (Figura 7) sugere ter havido um destino diferente para o elemento solúvel, que não a simples precipitação. Como as características químicas dos dois solos foram niveladas (Tabela 3), permanecendo como variável tão somente as doses de Si aplicadas, é razoável admitir que uma fração do H_4SiO_4 migrou para as superfícies oxidicas da fração argila (Gb, Hm, Gt e Fe_o) (Tabela 1) onde foi adsorvida. Essa adsorção provocou deslocamento (dessorção) de parte do P previamente retido que difundiu-se para a fase líquida tornando-se disponível às plantas, conforme mostrado pelos dois pontos de máximo da superfície de resposta da Figura 5. Ou seja, quedas nos teores de H_4SiO_4 na solução do solo (Figura 7) coincidiram com incrementos do P acumulado nas plantas (Figura 5).

A argumentação anterior coincide com as conclusões de Roy et al. (1971) que estudaram a dessorção de P em cinco solos ácidos havaianos de diferentes mineralogias, cultivados com cana-de-açúcar. O efeito foi mais pronunciado em solos caulínicos, capazes de manter maiores concentrações de H_4SiO_4 em solução, que nos gibbsíticos. Observações dos dados mineralógicos da Tabela 1, mostram 280 g.kg⁻¹ de caulinita e 77 g.kg⁻¹ de gibbsita no Cambissolo contra 120 g.kg⁻¹ e 290 g.kg⁻¹, respectivamente, no Latossolo.

Na época (113 dias) em que houve máximo acúmulo de P (28,03 mg.vaso⁻¹) na MSPA das plantas cultivadas no Cambissolo (Figura 5), o conteúdo do nutriente relativo ao tratamento controle (sem adição artificial de Si) foi de 24,32 mg.vaso⁻¹. O diferencial entre os dois valores, 3,71 mg.vaso⁻¹, representa um ganho de 15,25% em P acumulado nas plantas em relação ao tratamento controle.

Deslocamento de P por Si implica na adsorção específica deste último, provavelmente na forma $H_3SiO_4^-$, às superfícies oxidicas da fração argila antes

ocupadas por P (Obihara e Russel, 1972). Parece, portanto, ter ocorrido uma troca de ligantes no complexo de superfície. Uma representação química provável do fenômeno pode ser deduzida do esquema:



Incrementos de H_4SiO_4 na fase aquosa (aq) deslocam o equilíbrio químico para a direita favorecendo a dessorção de H_2PO_4^- para a fase líquida, prontamente substituído por H_3SiO_4^- no complexo de superfície (troca de ligantes). O predomínio da força de ligação do H_2PO_4^- sobre o H_3SiO_4^- , sugerido por Hingston et al. (1972), pode ter sido revertido pelo efeito do incremento das doses de Si aplicadas.

Embora Hingston et al. (1972) tenham demonstrado em condição de laboratório (envelopes de adsorção) com goethita sintética que a perda do primeiro próton do H_4SiO_4 para formar H_3SiO_4^- ocorre em $\text{pH} \sim 9,0$, que coincide com o pK_1 do H_4SiO_4 , só possível, a princípio, em solos alcalinos, os dados de acidez em água monitorados durante os experimentos (Tabela 11) contrastam com essas observações. Primeiro, porque a acidez dos solos permaneceu constante numa mesma época apesar do incremento de silício (Tabela 11) e ao longo das épocas, não tendo sido detectada qualquer significância estatística entre doses de Si e pH durante os experimentos. Segundo, porque era esperado um aumento de pH, considerando-se a fonte de Si empregada, o CaSiO_3 , produto constante da formulação das escórias de siderurgia, de reconhecida ação alcalinizante. Portanto, nas condições experimentais, é razoável admitir que o mecanismo de adsorção de Si não foi dependente de pH e que, num ambiente heterogêneo e dinâmico como o sistema solo, devem existir outras forças que não apenas o pH, capazes de desprotonar o H_4SiO_4 . De fato, McKeague e Cline

(1963c) demonstraram considerável adsorção de Si em solos de Porto Rico (EUA) em pH 4,8.

O percentual de P deslocado (dessorvido) da fração argila do Cambissolo pode ser considerado de pequena magnitude quando comparado com os valores encontrados por Roy et al. (1971), que foram de 47% em solos caulíníticos e de 9% em solos gibbsíticos. Também no presente trabalho não se observou aumento no conteúdo de P das plantas cultivadas no LE, solo que apresenta teores elevados de gibbsita (Tabela 1). Este fato provavelmente explica o ganho sutil na produção de MSPA das plantas cultivadas no Cambissolo em relação ao Latossolo (Figuras 2 e 3). Demonstra também a sensibilidade do modelo estatístico adotado para explicar o fenômeno, atribuindo-o possivelmente ao P dessorvido por Si.

TABELA 11. Comportamento do pH em água do Latossolo e do Cambissolo em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....pH - Latossolo.....			
0	5,70	6,02	5,75
112	5,60	6,00	5,75
170	5,67	6,00	5,75
225	5,65	5,95	5,66
280	5,80	5,92	5,50
340	5,63	5,86	5,60
.....pH - Cambissolo.....			
0	4,55	5,15	5,16
75	4,60	5,25	5,17
112	4,63	5,13	5,13
150	4,63	5,15	5,03
187	4,55	5,10	5,10
225	4,57	5,02	5,02

4.6 Fósforo disponível nos solos pelos extratores Mehlich-1 e Resina

Os teores médios de P solúvel no extrator Mehlich-1 monitorados nos dois solos nas três épocas de avaliação encontram-se na Tabela 12. Numa mesma época e entre épocas, a análise de variância não detectou quaisquer diferenças significativas que pudessem associar o P disponível pelo extrator com o efeito do silício em desorver o nutriente.

TABELA 12. Teores de P extraídos pelo extrator Mehlich-1 no Latossolo e no Cambissolo cultivados com *E. grandis*, considerando doses de Si e épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
..... P – Mehlich-1 no LE (mg.dm ⁻³).....			
0	6,00	5,25	4,50
112	6,00	5,00	4,00
170	6,00	4,33	4,25
225	6,25	5,25	4,66
280	5,66	5,00	4,50
340	6,33	5,66	4,00
..... P – Mehlich-1 no C (mg.dm ⁻³).....			
0	9,50	7,00	6,66
75	10,00	7,50	6,50
112	9,66	7,66	7,00
150	8,66	8,50	6,66
187	9,75	8,33	6,75
225	9,00	7,75	7,25

As concentrações de P em solução nos dois solos determinadas pela Resina durante a condução dos experimentos estão na Tabela 13. À semelhança do ocorrido com o P extraído pelo Mehlich-1, também neste caso a análise de variância não mostrou diferenças nos teores do nutriente que pudessem ser atribuídas à interação entre as doses de Si e as épocas de avaliação.

TABELA 13. Teores de P extraídos pela Resina no Latossolo e no Cambissolo cultivados com *E. grandis*, em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Si (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
..... P – Resina no LE (mg.dm ⁻³).....			
0	62,66	46,75	40,75
112	59,33	46,50	38,00
170	64,00	46,33	34,25
225	58,75	44,50	39,66
280	61,66	40,75	38,25
340	64,33	46,66	38,66
..... P – Resina no C (mg.dm ⁻³).....			
0	26,75	21,50	13,33
75	26,00	18,50	14,25
112	26,66	22,66	13,66
150	26,00	22,50	13,33
187	26,00	22,33	13,25
225	26,25	20,25	13,25

Infere-se portanto que, ao contrário das plantas (Figuras 4 e 5), os extratores utilizados não tiveram sensibilidade suficiente para detectar diferenças nos teores de P dos solos, associando-as a uma possível interação Si-P. A diminuição das concentrações com as épocas, mais evidente pela Resina (Tabela 13) que pelo Mehlich-1 (Tabela 12), pode ser atribuída a fatores diversos atuando de forma combinada.

No LE, a dose de P utilizada, 225 mg.dm⁻³, resultou num aporte de 607,5 mg do nutriente em cada vaso ocupado com 2,7 dm³ de solo, enquanto o conteúdo máximo do elemento determinado nas plantas cultivadas, 39 mg.vaso⁻¹, aos 120 dias (Tabela 5), representou 6,4% do total de fósforo aplicado. De modo semelhante, no C, o maior conteúdo medido nas plantas, 30 mg.vaso⁻¹, na mesma época (Tabela 6), correspondeu a 7,4% do total aplicado no vaso (405 mg, para uma dose de P de 150 mg.dm⁻³).

Diversas inferências podem ser deduzidas desses cálculos: (a) a diminuição dos teores de P com o tempo (Tabelas 12 e 13) deve-se muito pouco à exaustão do nutriente dos solos pelo eucalipto em crescimento, mesmo numa fase vegetativa de intensa absorção de P, conforme Novais et al. (1990), já que, nos dois solos, as plantas cultivadas absorveram percentuais bastante reduzidos do total aplicado nos vasos; (b) durante os 120 dias de condução dos experimentos não houve estresse de P nos solos que pudesse comprometer o desenvolvimento normal das plantas; (c) as doses de P utilizadas, consideradas baixas durante a fase de planejamento experimental em função das elevadas CMAFs dos solos (Tabela 1), mostraram-se, na realidade, altas o suficiente para manter níveis elevados de P disponível pelos extratores, a ponto de interferir em sua habilidade de detectar o reduzido percentual de dessorção (15,25%), este avaliado de forma indireta nas plantas cultivadas no Cambissolo (Figura 5); (d) a diminuição das concentrações do P disponível pelos extratores (Tabelas 12 e 13) parece ter sido causada muito mais pela contínua adsorção do elemento com o tempo. Estas observações concordam com relatos de Kamprath e Watson (1980) e Fassbender (1986). Segundo esses autores, mesmo na ausência de plantas, foi constatada considerável adsorção de P com o tempo em solos tropicais com grandes quantidades de superfícies oxídicas na fração argila, como é o caso dos materiais utilizados neste trabalho (Tabela 1).

No caso do Mehlich-1 (Tabela 12), a não significância pode ter sido ainda devida a uma exaustão do mesmo pelo consumo excessivo de íons H^+ , Cl^- e SO_4^{2-} de sua formulação no processo de deslocamento do P adsorvido em materiais muito argilosos, como é o caso dos solos utilizados nesta pesquisa (Tabela 1), de acordo, portanto, com observações de Holford (1980), Kamprath e Watson (1980), Bahia Filho (1982) e Raij (1991). Quanto à Resina, apesar de seus valores (Tabela 13) serem mais elevados que os do Mehlich-1 (Tabela 12), pelo

menos nestas condições experimentais não foi capaz de simular de forma mais eficiente que o extrator ácido o processo de absorção radicular. Parece que os teores elevados de P disponível nos solos durante todo período experimental também interferiram nos equilíbrios de troca iônica nas interfaces solo-solução resina, contribuindo, de forma adicional, para prejudicar a sua sensibilidade.

4.7 Frações fosfatadas em plantas

4.7.1 Fósforo inorgânico (Pi)

Os teores de Pi em folhas apicais de plantas cultivadas no LE encontram-se na Tabela 14. Ajustando-se uma equação de regressão (Figura 10) considerando doses de Si aplicadas no solo e épocas de avaliação, evidenciam-se os efeitos interativos desses dois fatores no teor estimado de Pi (eixo vertical).

Nota-se que o Pi cresce em função de uma redução linear das doses de Si e de um incremento linear das épocas de avaliação (Figura 10). Fixando-se a época em 120 dias, correspondente ao maior valor de Pi, e variando-se as doses de 0 (tratamento controle) a 340 mg Si.dm⁻³, obtêm-se, respectivamente, 124,28; 120,64; 118,76; 116,97; 115,18 e 113,23 µg Pi.g⁻¹. A maior dose proporcionou um valor de Pi menor que do tratamento controle que não recebeu qualquer adição artificial de Si. Mantendo-se constante a dose de Si, por exemplo, 340 mg.dm⁻³, encontram-se teores de Pi iguais a 77,03; 95,13; e 113,23 µg.g⁻¹, aos 60, 90 e 120 dias, respectivamente, mostrando que, incrementos de época sempre corresponderam a aumentos de Pi.

Os teores de Pi em folhas apicais das plantas cultivadas no C foram dispostos na Tabela 15 e a equação de regressão ajustada a partir desses dados aparece na Figura 11.

TABELA 14. Teores medidos de Pi em folhas apicais de *E. grandis* cultivado no Latossolo, em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Silício (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Pi (µg.g ⁻¹).....			
0	79,60	117,73	128,83
112	81,96	105,09	127,84
170	85,71	89,20	95,64
225	85,83	91,30	125,74
280	79,37	103,54	114,75
340	81,08	90,28	117,97

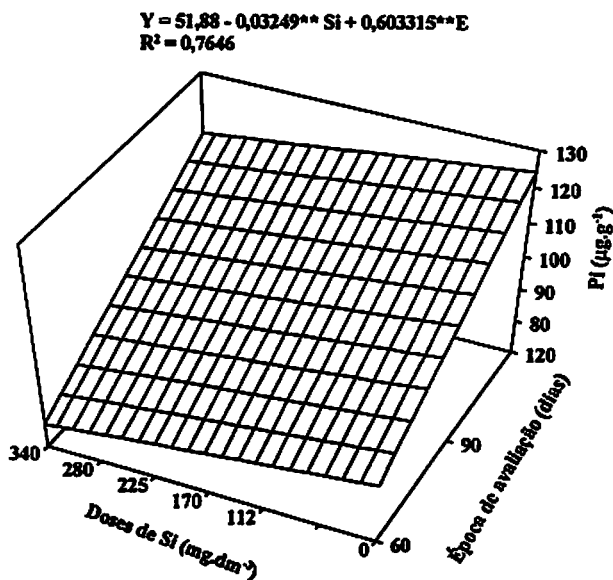


FIGURA 10. Equação de regressão para Pi em folhas apicais de *E. grandis* (eixo vertical) determinada em função das doses de Si no Latossolo e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste t.

TABELA 15. Teores medidos de Pi em folhas apicais de *E. grandis* cultivado no Cambissolo, em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Silício (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Pi (µg.g ⁻¹).....			
0	122,26	104,59	89,45
75	110,83	103,55	89,24
112	129,26	107,59	90,44
150	101,85	96,91	73,37
187	111,14	102,64	82,49
225	114,81	108,38	81,46

$$Y = 150,91 - 0,0308622 * Si - 0,510331 ** E$$

$$R^2 = 0,7944$$

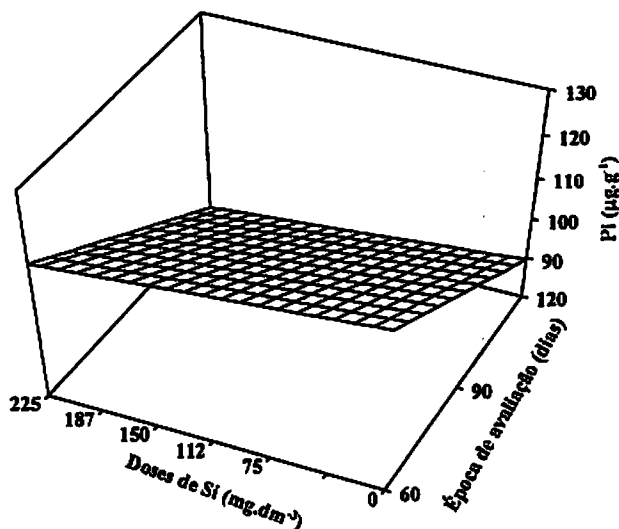


FIGURA 11. Equação de regressão para Pi em folhas apicais de *E. grandis* (eixo vertical) determinada em função das doses de Si no Cambissolo e das épocas de avaliação.

* e ** significativo a 5 e 1% pelo teste t, respectivamente.

Observa-se que o Pi aumenta em função de reduções lineares das doses de Si aplicadas e das épocas de avaliação (Figura 11). Mantendo-se fixa a época em 60 dias, próximo da qual parece ter havido maior teor de Pi, e alterando-se as doses de 0 (tratamento controle que não recebeu adição de Si) a 225 mg Si.dm⁻³, são obtidos valores de Pi estimados respectivamente iguais a 120,29; 117,98; 116,83; 115,66; 114,52 e 113,35 µg.g⁻¹. Nesse caso, à semelhança do ocorrido com o LE, o Pi relativo à maior dose também foi inferior ao do tratamento controle. A dose 225 mg Si.dm⁻³ em épocas variáveis (60, 90 e 120 dias) proporcionou valores decrescentes, respectivamente iguais a 113,35; 98,04 e 89,67 µg Pi.g⁻¹.

Embora épocas e doses tenham interagido de forma a reduzir o Pi, a contribuição do primeiro fator foi mais nítida, o que pode ser comprovado pelo diferencial de teores entre o tratamento controle e a maior dose quando se fixou a época (6,94 µg.g⁻¹), e entre a maior e a menor época quando se manteve a dose (26,68 µg.g⁻¹). Além do que, houve maior significância estatística para épocas (1%) que para doses (5%).

Assim, em ambos os solos, incrementos de Si não corresponderam a maiores concentrações de Pi em folhas apicais do eucalipto. Ao contrário, parece que o Si foi “prejudicial” à planta em sua capacidade de armazenar P nos vacúolos, podendo as oscilações desta variável em folhas ser atribuídas ao fator tempo.

4.7.2 Fósforo orgânico (Po)

Na Tabela 16 foram dispostos os dados de Po medidos em folhas apicais do eucalipto cultivado no LE. A equação de regressão ajustada para os valores estimados de Po encontra-se na Figura 12.

TABELA 16. Teores de Po em folhas apicais de *E. grandis* cultivado no Latossolo, em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Silício (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Po (µg.g ⁻¹).....			
0	31,37	56,09	60,97
112	31,31	32,37	52,75
170	35,70	48,48	56,46
225	50,15	50,98	57,28
280	40,36	43,65	68,73
340	44,02	45,84	53,73

$$Y = 16,35 + 0,0116296*Si + 0,325049**E$$

$$R^2 = 0,6227$$

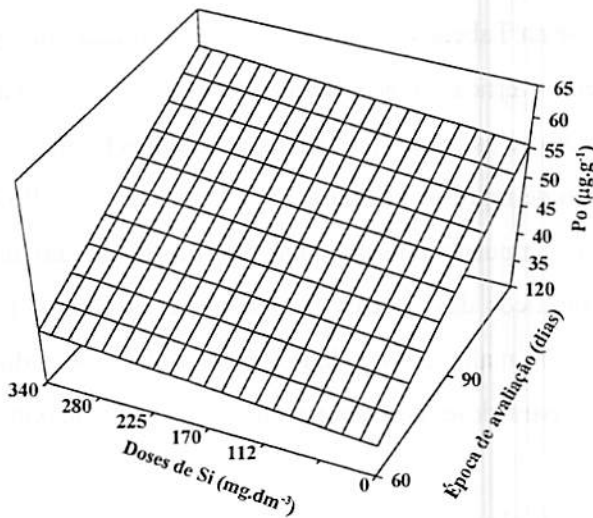
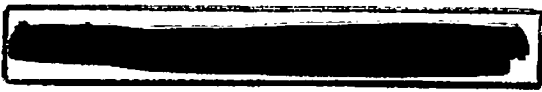


FIGURA 12. Equação de regressão para Po em folhas apicais de *E. grandis* (eixo vertical) determinada em função das doses de Si no Latossolo e das épocas de avaliação.

* e ** significativo a 5 e 1% pelo teste t, respectivamente.



Nota-se que o Po estimado aumenta em resposta a incrementos lineares das doses e das épocas de monitoramento. Com a época fixa, por exemplo em 120 dias, e as doses crescentes de 0 (tratamento controle) a 340 mg Si.dm⁻³, encontram-se para Po teores respectivamente iguais a 55,35; 56,55; 57,22; 57,87; 58,21 e 59,20 µg.g⁻¹, com diferencial de 3,85 µg entre o tratamento controle e a maior dose.

Épocas alteradas (60, 90 e 120 dias) para a mesma dose (340 mg.dm⁻³) proporcionaram teores respectivamente iguais a 39,30; 49,55 e 59,20 µg Po.g⁻¹. Nesse caso, cada 30 dias de acréscimo em época equivaleram a aproximadamente 10 µg Po.g⁻¹, um ganho quase três vezes maior que o diferencial proporcionado pela elevação das doses em relação ao tratamento controle.

Nas mesmas condições, os valores medidos de Po em plantas cultivadas no C encontram-se na Tabela 17. Ajustando-se uma equação de regressão (Figura 13) para Po (eixo vertical) considerando doses de Si aplicadas e épocas de avaliação, destacam-se os efeitos interativos desses dois fatores.

A equação de regressão (Figura 13) demonstra que o Po estimado cresce de duas maneiras: impulsionado por uma redução linear das doses e devido a incrementos quadráticos das épocas. Derivando-se os pontos de máximo dessa superfície (pontos de maior convexidade), encontram-se 86,3 dias para época e 109,5 mg Si.dm⁻³ para dose, correspondentes a um valor máximo de Po igual a 82,20 µg.g⁻¹.

Doses mais elevadas sempre resultaram em menores teores de Po. Fixando-se a época em 60 dias, por exemplo, e incrementando-se as doses de 0 (tratamento controle) até 340 mg Si.dm⁻³, obtêm-se valores de Po respectivamente iguais a 71,45; 68,66; 67,29; 65,88; 64,49 e 63,09 µg.g⁻¹, ou seja, no tratamento que não recebeu qualquer adição artificial de Si o teor de Po foi 8,36 µg maior que aquele correspondente à maior dose aplicada.

TABELA 17. Teores medidos de Po em folhas apicais de *E. grandis* cultivado no Cambissolo, em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Silício (mg.dm ⁻³)	Épocas de avaliação (dias)		
	60	90	120
.....Po (µg.g ⁻¹).....			
0	71,68	73,34	60,27
75	75,17	82,25	47,07
112	68,88	85,97	52,31
150	53,33	98,80	70,10
187	63,89	70,04	62,14
225	67,91	81,61	62,18

$$Y = -62,91 - 0,121873^{**}Si + 3,51208^{**}E - 0,0212126^{**}E^2 + 0,00141204^{**}SiE$$

$$R^2 = 0,7314$$

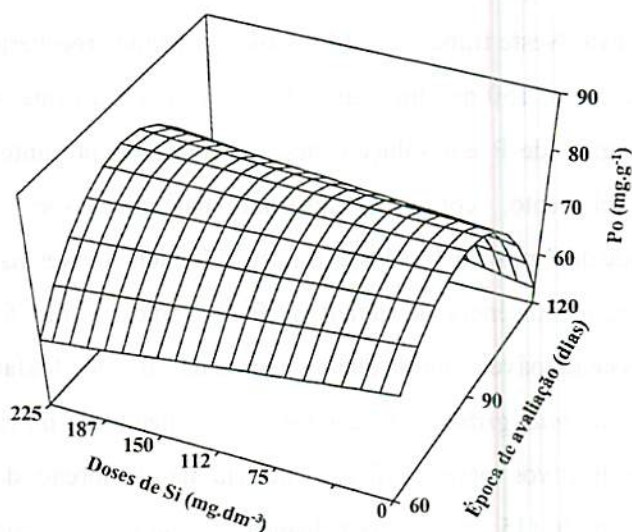


FIGURA 13. Equação de regressão para Po em folhas apicais de *E. grandis* (eixo vertical) determinada em função das doses de Si no Cambissolo e das épocas de avaliação.

** significativo a 1% pelo teste t.

Época alteradas (60, 90 e 120 dias) corresponderam a teores crescentes até o ponto de máximo (86,3 dias), reduzindo-se em seguida por influência acentuada do termo linear (E) positivo. Assim, a dose fixa de 109,5 mg Si.dm⁻³ resultou em teores respectivamente iguais a 67,49; 81,90 e 58,11 µg Po.g⁻¹.

Embora a análise de variância tenha detectado significância nas interações entre doses de Si e épocas de avaliação para frações de P (a exceção do P_{ts}) em folhas apicais do eucalipto, a visualização do fenômeno através de superfícies de resposta, indica, de um modo geral, tratar-se de um efeito que pode ser atribuído mais às épocas que às doses. Conforme demonstrado por Fernandes et al. (1998) em feijoeiro e Furtini Neto et al. (1998) em eucalipto, as oscilações de P_{ts}, P_i e P_o manifestaram-se de forma mais nítida quando as plantas foram cultivadas sob condição de estresse induzido por omissão de P no solo ou em solução nutritiva. Neste trabalho, os dois solos utilizados receberam doses únicas de P (225 mg.dm⁻³ e 150 mg.dm⁻³ para LE e C, respectivamente) suficientes para manter 0,2 mg.L⁻¹ de P em solução, descaracterizando portanto a condição de estresse do elemento, conforme mostrado nas discussões a respeito da disponibilidade de P nos solos pelos extratores Mehlich-1 e Resina.

Assim, na ausência de déficit de P nos solos, como foi o caso deste trabalho, parece razoável admitir que, os teores das frações fosfatadas em folhas apicais de *Eucalyptus grandis*, ao contrário do conteúdo do nutriente na MSPA, não foram indicativos para avaliação indireta da dessorção de P por Si, de pequena magnitude (15,25%), à semelhança do que ocorreu com os extratores Mehlich-1 e Resina.

4.8 Atividade da fosfatase ácida

A atividade da fosfatase ácida em folhas apicais de plantas cultivadas no LE e no C encontram-se na Tabela 18. Foram ajustadas equações de regressão (Figura 14 e 15) mostrando a interação entre doses de Si aplicadas e as épocas de avaliação, na atividade de fosfatase (eixo vertical).

TABELA 18. Atividade da fosfatase ácida em folhas apicais de *E. grandis* cultivado no Latossolo e no Cambissolo, em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Doses de Silício (mg.dm ⁻³)	Época de avaliação (dias)		
	60	90	120
Atividade da fosfatase ácida (mU)^{1/}			
.....LE.....			
0	334,72	198,57	80,04
112	310,30	93,22	32,98
170	283,46	173,32	41,12
225	406,99	175,99	38,94
280	318,33	164,67	31,77
340	379,32	108,93	64,51
.....C.....			
0	379,34	154,98	45,93
75	248,48	158,69	41,68
112	470,80	153,94	30,37
150	295,07	99,44	52,36
187	271,14	184,36	52,16
225	283,59	152,13	35,63

^{1/} mU (miliunidade) = nanomol de substrato hidrolisado.minuto⁻¹.g⁻¹

$$Y = 973,96 - 0,287448^* SI + 0,0007835^* SI^2 - 13,1077^{**} E + 0,0461784^{**} E^2$$

$$R^2 = 0,9260$$

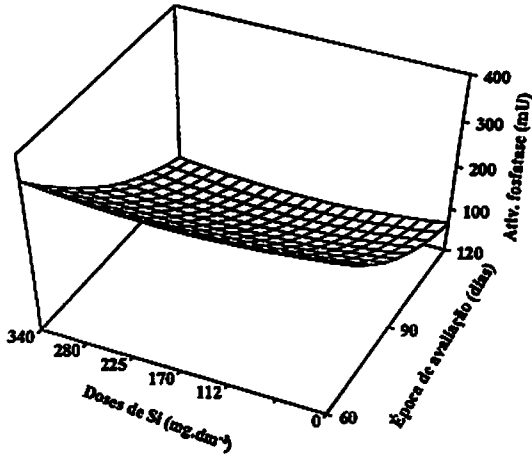


FIGURA 14. Equação de regressão para atividade da fosfatase ácida em folhas apicais de *E. grandis* considerando doses de Si no Latossolo e épocas de avaliação.

$$Y = 894,35 - 0,117777^* SI - 11,6223^{**} E + 0,0387762^{**} E^2$$

$$R^2 = 0,9072$$

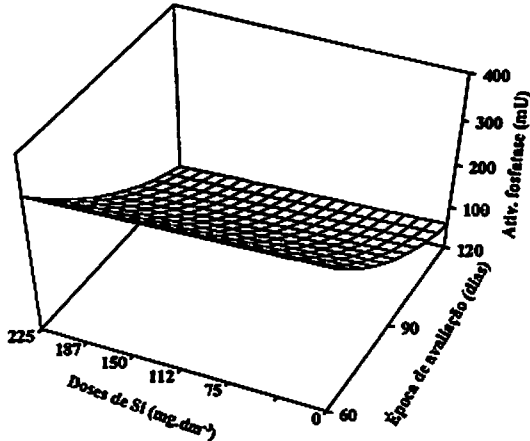


FIGURA 15. Equação de regressão para atividade da fosfatase ácida em folhas apicais de *E. grandis* considerando doses de Si no Cambissolo e épocas de avaliação.

* e **: significativo a 5 e 1% pelo teste de t, respectivamente.

Em plantas cultivadas no LE (Figura 14) observa-se que a atividade da fosfatase ácida é função de uma redução quadrática das doses e das épocas de avaliação. Fixando-se a época, por exemplo, em 60 dias, e alterando-se as doses de 0 (tratamento controle) a 340 mg Si.dm⁻³, encontram-se valores respectivamente iguais a 353,74; 331,40; 327,77; 328,73; 334,69 e 346,58 mU, sendo o incremento observado a partir da dose 170 mg Si.dm⁻³ devido à contribuição do termo quadrático (Si²) positivo do polinômio. A atividade é máxima no tratamento controle que não recebeu adição artificial de Si, mínima na dose 170 mg Si.dm⁻³ e, mesmo tendo havido uma subida de valores a partir dessa dose, o último dado estimado é cerca de sete unidades menor que o do tratamento controle. Mantendo-se constante a dose (340 mg Si.dm⁻³) e aumentando-se a época (60, 90 e 120 dias), obtêm-se respectivamente, 346,58; 161,15 e 58,80 mU. Comparando-se os números das duas situações descritas, percebe-se que a queda de atividade foi muito mais drástica devido às épocas que às doses, além de ter havido maior significância estatística para época (1%) que para dose (5%).

No Cambissolo (Figura 15) o comportamento da enzima foi semelhante, entretanto, sem contribuição quadrática das doses. Neste caso, a atividade estimada é função de uma redução linear de doses e quadrática de épocas. Aos 60 dias, para doses crescentes de 0 (tratamento controle) a 225 mg Si.dm⁻³, os valores de atividade foram respectivamente iguais a 336,60; 327,77; 323,41; 318,93; 314,58 e 310,10 mU. Quanto maior a dose, menor a atividade com diferencial de 26,5 mU entre o tratamento controle e a máxima dose. Para uma mesma dose (225 mg Si.dm⁻³) e épocas variáveis (60, 90 e 120 dias), a atividade correspondeu respectivamente a 310,10; 135,94 e 31,55 mU demonstrando, também com maior significância estatística, um papel mais destacado para a época em reduzir a atividade enzimática.

O comportamento da fosfatase, conforme Bieleski e Ferguson (1983) e Furtini Neto et al. (1998), influi na dinâmica das frações fosfatadas na planta. Assim, menor disponibilidade de P no solo (ou em soluções nutritivas) provoca maior atividade enzimática, necessária para converter o P vacuolar ou de reserva (Pi) em Po citoplasmático. A redução da atividade da fosfatase com o tempo coincidiu com a inexistência de estresse de P nos solos durante a condução dos experimentos, conforme demonstrado nas discussões a respeito dos extratores Mehlich-1 e Resina. Por conseqüência, a ausência de estresse do nutriente também nas plantas justifica não ter havido conversões de Pi em Po através da fosfatase. Este resultado concorda com observações de Fernandez e Ascencio (1994). Segundo esses autores, a fosfatase não foi um bom indicador do estresse de P em plantas com deficiência moderada no nutriente, sendo a queda na atividade enzimática uma função da idade das plantas.

Considerações metabólicas à parte, já que a fosfatase foi mais influenciada pelas épocas que pelas doses de Si, esse raciocínio, além de reforçar os argumentos discutidos no item 4.7, demonstra que, à semelhança do Pi e do Po, a fosfatase não foi um bom parâmetro de avaliação indireta do efeito do Si na dessorção de P dos solos.

5 CONCLUSÕES

A interação silício-fósforo no Cambissolo demonstrou ser possível otimizar o ganho em fósforo pelas plantas, quando o silício for aplicado no solo numa etapa posterior à adubação fosfatada. Dimensionado indiretamente em plantas e isolado do efeito do pH dos solos, conforme o objetivo proposto e a metodologia utilizada no trabalho, o ganho em fósforo, de pequena magnitude, não foi detectado por extratores de solo de ampla utilização e nem por refinadas técnicas de mensuração em plantas do acúmulo do nutriente nos vacúolos e de sua liberação e transformação por ação enzimática.

Como o efeito foi demonstrado em solo menos intemperizado, caulínico, com baixos teores de silício solúvel em água, as pesquisas da interação entre silício e fósforo para aproveitamento do silício em programas futuros de adubação visando a maximização da dessorção de fósforo, devem levar em conta que parece ser limitada a capacidade da fase líquida dos solos em receber adições artificiais de silício sem provocar a precipitação e conseqüente inativação química do elemento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V.H. **Avaliação da fertilidade do solo (superfícies de resposta-modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta)**. Viçosa: UFV, 1994. 75p.
- ANDERSON, D.L.; SNYDER, G.H.; MARTIN, F.G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag or overglades histisols. **Agronomy Journal**, v.83, p.870-874, 1991.
- ASCENCIO, J. Acid phosphatase as a diagnostic tool. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.25, n.9/10, p.1553-1564, 1994.
- BAHIA FILHO, A.F.C. **Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do planalto central com diferentes características texturais e mineralógicas**. Viçosa, 1992. 179p. (Tese de Doutorado).
- BALDEON, J.R.M. **Efeito da ação alcalinizante e da competição entre silicato e fosfato na eficiência do termofosfato magnésiano em solos ácidos**. Piracicaba, 1995. 88p. (Tese de Doutorado)
- BELANGER, R.R.; BOWEN, P.A.; EHRET, D.L.; MENZIES, J.G. Soluble silicon, its role in the crop and disease management of greenhouse crops. **Plant Disease**, Quebec, v.74, n.4, p. 329-336, 1995.
- BESFORD, R.T. A phosphatase as a potential indicator of phosphorus status of glasshouse cucumber (*Cucumis sativus*). **Journal of Science and Food Agriculture**, London, v.29, n.1, p.87-91, 1978.
- BESFORD, R.T. Phosphorus nutrition and acid phosphatase activity in the leaves of seven plant species. **Journal of Science Food Agriculture**, Oxford, v.30, n.4, p.281-285, 1979.
- BIELESKI, R.L. Phosphate pools, phosphate transport and phosphate availability. **Annual Review of Plant Physiology**, Polo Alto, v.24, p.225-252, 1973.

- BIELESKI, R.L.; FERGUSON, I.B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R.L. (eds.). **Enciclopedia of plant physiology: inorganic plant nutrition**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p.422-429.
- BIRCH, H.F. Phosphate response, base saturation and silica relationships in acids soils. **Journal of Agricultural Science**, v.43, p.229-235, 1953.
- CAMARGO, O.A.; RAIJ, B. van; GROHMANN, F. Fixação do fósforo em solos avaliado pelo índice de Bache e Willians e sua correlação com outras propriedades. **Ciência e Cultura**, v.26, p.581-685, 1974.
- CHAPIN, F.S.; FOLLET, J.M.; O'CONNOR, K.F. Growth, phosphate absorption and phosphorus chemical fractions in two chionochlos species. **J. Ecol.**, v.70, p.305-321, 1982.
- COELHO, M.M.M.; KORNDÖRFER, G.H.; MIZUTANI, C.T. Avaliação de métodos de extração do silício solúvel em solos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25, Goiânia, GO, 1996. **Resumos...** Goiânia:SBCS, 1996. p.533.
- * CURI, N. Mineralogia e sua relação com o comportamento de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24, Goiânia, GO, 1993. **Resumos...** Goiânia:SBCS, 1993. p.27.
- CURI, N.; FRANZMEIER, D.P. Toposequense of oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.2, p.341-346, 1984.
- EMADIAN, S.F.; NEWTON, R.J. Growth enhancement fo loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon. **Journal of Plant Physiology**, v.134, p.98-103, 1959.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro:EMBRAPA, 1997. 212p.
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras:ESAL/FAEPE, 1994. 227p.

- FASSBENDER, H.W. **Química de suelos com ênfasis em suelos de America Latina**. San José:IICA, 1986. 398p.
- FERNANDES, L.A.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; GUEDES, G.A.A.; LIMA, J.M. Fósforo e atividade da fosfatase ácida em plantas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.769-778, 1998.
- FERNANDEZ, D.S.; ASCENCIO, J. Acid phosphatase activity in bean and cowpea plants grown under phosphorus stress. **The Journal of Plant Nutrition**, New York, v.15, n.2/3, p.229-241, 1994.
- FISHER, R.A. A preliminary note on the effect of sodium silicate in increasing the yield of barley. **Journal of Agricultural Science**, v.19, p.132-139, 1929.
- FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. Testing soil for phosphorus. In:WESTERNAN, R.L. (ed.) **Soil testing and plant analysis**. Third edition. Madison: America Society of Agronomy, 1990. p.141-180.
- FOX, R.; KÄMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirement of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.34, p.902-907, 1970.
- FREIRE, J.C.; RIBEIRO, M.A.V.; BAHIA, V.G.; LOPES, A.S.; AQUINO, L.H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.4, n.1, p.5-8, 1980.
- FURTINI NETO, A.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; OLIVEIRA, M.F.G. Frações fosfatadas em mudas de *Eucalyptus*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.2, p.267-274, 1998.
- GALLEZ, A.; HERBILLON, A.J.; JUO, A.S.R. Characteristics of silica sorption and solubility as parameters to evaluate the surface properties of tropicals soils. I. The index of silica reactivity. **Soil Science Society of America Journal**, v.41, p.1147-1149, 1997.
- GALLO, J.R.; FURLANI, P.R. Determinação de silício em material vegetal pelo método colorimétrico do azul de molibdênio. **Bragantia**, Campinas, v.37, n.2, p.5-11, 1978.

GARCIA, M.; ASCENCIO, J. Root morphology and acid phosphatase activity in tomato plants during development of and recovery from phosphorus stress. *The Journal of Plant Nutrition*, New York, v.15, n.11, p.2491-2503, 1992.

GIAROLA, N.F.B.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; CHAGAS, C.S.; FERREIRA, M.M. Solos da região sob influência do reservatório da hidrelétrica de Itutinga/Camargos (MG): perspectiva ambiental. Lavras: CEMIG/FAEPE, 1997. 101p.

GOMES, F.P. *Curso de estatística experimental*. Piracicaba: Nobel, 1987. 467p.

* GUALBERTO, V.; RESENDE, M.; CURI, N. Química e mineralogia de Latossolos com altos teores de ferro, da Amazônia e do Planalto Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.11, n.3, p.254-252, 1987.

HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorptions envelopes. *Journal of Soil Science*, v.23, p.177-192, 1972.

HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. II. Desorption of anions from hydrous oxide surfaces. *Journal of Soil Science*, London, v.25, n.1, p.16-26, 1974.

HOGUE, E.; WILCOX, G.E.; CANTLIFFE, D.J. Effect of soil phosphorus levels on phosphate fractions in tomato leaves. *J. Am. Soc. Hortic. Science*, v.95, p.174-176, 1970.

HOLFORD, I.C.R. Greenhouse evaluation of phosphorus soil test in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. *Soil Science Society America Journal*, v.44, p.555-559, 1980.

HOLT, P.F.; KING, D.T. The chemistry of silica surfaces. *Journal of Chemical Society*, p.773-779, 1955.

ILER, R.K. *The chemistry of silica*. New York: John Wiley, 1979. 400p.

- JARAMILO, R.G.C. **Avaliação do estado nutricional em fósforo de oito genótipos venezuelanos de sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L. Moench).** Piracicaba:ESALQ, 1996. 80p. (Dissertação de Mestrado)
- JIANFENG, M.A.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth and phosphorus uptake of rice. **Plant and Soil**, v.126, p.115-119, 1990.
- JOLY, W.L. **A química dos não metais.** São Paulo: Edgard Blücher, 1966. 176p.
- JONES, L.H.P.; HANDRECK, K.A. Silica in soils, plants and animals. **Advances in Agronomy**, v.19, p.107-147, 1967.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5M NaOH concentration treatment of iron oxides in soils. **Clays and Clay Minerals**, New York, v.30, p.401-408, 1982.
- KÄMPRATH, E.J. Phosphorus fixation and availability in weathered soils. In:SIMPÓSIO SOBRE CERRADO, BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4, Brasília, 1976. São Paulo:EDUSP, 1977. p.333-347
- KÄMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. Conventional soils and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KÄMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture.** Madison: America Society of Agronomy, 1980. p.433-469.
- KORNDÖRFER, G.H.; DATNOFF, L.E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças de cana-de-açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.70, 1995. 3p.
- LARSEN, S. Residual phosphate in soils. In: RESIDUAL VALUE OF APPLIED NUTRIENTS. **Technical Bulletin**, Londres, HMSO, v.20, p.34-71, 1971.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. In:NORMAN, A.G. **Advances in agronomy.** New York:Academic Press, v.19, p.151-206,1967.
- LEAL, J.R.; VELOSO, A.C.X. Adsorção de fosfato em Latossolo sob vegetação de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.8, p.81-88, 1973.

- LEE, R.B.; RATCLIFFE, R.G. Phosphorus nutrition and the intracellular distribution of inorganic phosphate in pea root trips: a quantitative study using ^{31}P -NMR. *J. Exper. Bot.*, v.34, p.1222-1224, 1983.
- LEITE, P.C. **Interação silício-fósforo em Latossolo Roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação.** Viçosa, 1997. 87p. (Tese de Doutorado).
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils.** New York: John Wiley, 1979. 449p.
- MAHAN, B.H. **Química, um curso universitário.** Berkeley: Edgard Blücher, 1977. 655p.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípio e aplicações.** Piracicaba: POTAFOS, 1989. 201p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** 2.ed. London: Academic Press, 1995. 889p.
- MARTINEZ, H.E.P. Cinética da absorção e das frações fosfatadas em sete variedades de soja (*Glycine max* L. Merrill). Viçosa:UFV, 1992. (Relatório Final de Programa de Pós Graduação).
- MATOH, T.; KAIRUSMEE, P.; TOKAHASHI, E. Salt-induced damage to rice plants and alternation effect on silicate. *Soil Science Plant Nutrition*. Tokyo, v.32, n.2, p.295-304, 1986.
- McKEAGUE, J.A.; CLINE, M.G. Silica in soil solutions. *Advances in Agronomy*, Orlando, v.15, n.1, p.339-396, 1963a.
- McKEAGUE, J.A.; CLINE, M.G. Silica in soil solutions. I. The form and concentration of dissolved silica in aqueous extracts of some soils. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.43, n.1, p.70-82, 1963b.

- McKEAGUE, J.A.; CLINE, M.G. Silica in soil solutions. II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by others substances. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.43, n.1, p.83-95, 1963c.
- McLACHLAN, K.D. Leaf acid phosphatase activity and the phosphorus status of field-grown wheat. **Australian Journal of Agricultural Research**. Melbourne, v.33, n.3, p.453-464, 1987.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system bulffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Clarkson, v.7, n.2, p.317-327, 1960.
- MENGEL, K.; KIRKBY, A. **Principles of plant nutrition**. 4 ed. Berna: Int. Pot. Inst., 1987. 685p.
- MULJADI, D.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. I. The isotherms and the effect of pH on adsorption. **Journal of Soil Science**, v.17, p.212-229, 1966.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Nutrição mineral do eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (ed.) **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p.25-98.
- OBIHARA, C.H.; RUSSEL, E.W. Specific adsorption of the silicate and phosphate by soils. **Journal of Soil Science**, v.23, n.1, p.105-117, 1972.
- OLIVEIRA, M.G.A. **Determinação, adsorção e deslocamento recíproco de silício e fósforo em latossolos do Triângulo Mineiro**. Viçosa, 1984. 68p. (Dissertação de Mestrado).
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba:Ceres, 1991. 343p.
- RAIJ, B. van; CAMARGO, O.A. Silica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, v.32, n.11, p.223-236, 1973.
- RAIJ, B.van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 107p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S.B.; CORREA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2.ed. Viçosa: NEPUT, 1997. 304p.

- RESENDE, M.; CURI, N.; SANTANA, D.P. **Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações**. Brasília: MEC/ESAL/POTAFOS, 1988. 83p.
- ROSS, G.J.; WANG, C. Extractable Al, Fe, Mn and Si. In: CARTER, M.R. **Soil sampling and methods of analysis**. Canadian Society of Soil Science, 1993. p.239-246.
- ROY, A.C.; ALI, M.V.; FOX, R.L., SILVA, J.A. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian Latossol. In: SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY AND EVALUATION, Honolulu, 1971. **Proceedings...** New Delhi, 1971. p. 756-765.
- SAKAGAMI, K.I.; NAKAHARA, O.; HAMADA, R. Soluble silica in a tephra-derived spodosol in a mountains regions of Chichibu, Japan. **Soil Science Plant Nutrition**, v.39, n.1, p.139-151, 1993.
- SANCHEZ, P.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNECH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KÄMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison, 1980. p.471-514.
- SANTOS, C.D. **Fisiologia e bioquímica da digestão em *Erinis ello* (Lepidoptera: Sphingidae)**. São Paulo:USP, 1985. 178p. (Tese de doutorado em bioquímica).
- SCHWERTMANN, V. Use of oxalate for Fe extraction from soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v.53, p.244-246, 1973.
- SILVA, F.C.; BASSO, L.C. Avaliação da atividade "in vivo" da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.371-375, 1993.
- SILVA, J.A. Possible mechanisms for crop responses to silicate applications. In: SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY AND EVALUATION, Honolulu, 1971. **Proceedings...** New Delhi, 1971. p. 805-815.
- SMILLIE, R.M.; KROTKOV, F. The estimation of nucleic acids in some algae and higher plants. **Canadian Journal Botany**, v.38, p.31-49, 1960.

- SMYTH, T.J.; SANCHEZ, P.A. Effects of lime, silicate and phosphorus application to an oxisol on phosphorus sorption and ion retention. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.501-505, 1980.
- SOUZA, J.A.; CURI, N.; GUEDES, G.A.A. Relação entre mineralogia e adsorção-dessorção de fósforo em alguns Latossolos sob cerrado do Planalto Central. *Ciência e Prática*, Lavras, v.15, n.1, p.103-111,1991.
- SYERS, J.K.; BROWMAN, M.G.; SAMILLE, G.W.; COREY, R.B. Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir adsorption equation. *Soil Science Society America Proceedings*, v.37, p.358-363, 1973.
- TAKAHASHI, H.; MIYAKE, Y. Silica and plant growth. *Proc. Int. Semin. Soil Environ. Fert. Manage Intensive Agric.*, p.603-611, 1977.
- THOMAS, P.B.; PEASLEE, D.F. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. *Soil testing and plant analysis*. Madison: Soil Science Society America, 1973. p. 115-129.
- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, D.J. *Soil fertility and fertilizers*. 4.ed. New York, 1985. 754p.
- VALE, F.R.; GUILHERME, L.R.G.; GUEDES, G.A.A. *Fertilidade do solo: dinâmica e disponibilidade dos nutrientes de plantas*. Lavras:ESAL/FAEPE, 1993. 171p.
- VETTORI, L. *Métodos de análise de solos*. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim técnico, 7)
- VOLKWEISS, S.J.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In:SIMPÓSIO SOBRE CERRADO, BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4, Brasília, 1976. São Paulo:EDUSP, 1977. p.317-332.
- VOSE, P.B. Genetical aspects of mineral nutrition-progress to date. In: GABELMAN, H.W.; LOUGWMAN, B.C. (eds.) *Genetics aspects of plant mineral nutrition*. Dordrecht: Martinus Nyhoff, 1987. p.3-13.
- YOSHIDA, S.; NAVASERO, S.A.; RAMIREZ, E.A. Effects of silica and nitrogen supply on some leaf characteristics of the rice plant. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.31, n.1, p.5-56, 1969.

ANEXO

ANEXO A

	Página
TABELA 1A Resumo da análise de variância para produção de matéria seca da parte aérea (g.vaso^{-1}) de <i>E. grandis</i> cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	85
TABELA 2A Resumo da análise de variância para conteúdo de fósforo na matéria seca da parte aérea (mg.vaso^{-1}) de <i>E. grandis</i> cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	85
TABELA 3A Resumo da análise de variância para conteúdo de silício na matéria seca da parte aérea (mg.vaso^{-1}) de <i>E. grandis</i> cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	86
TABELA 4A Resumo da análise de variância para teor de silício solúvel no LE e no C (mg.dm^{-3}) em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	86
TABELA 5A Resumo da análise de variância para teor de fósforo inorgânico (Pi) em folhas apicais de <i>E. grandis</i> ($\mu\text{g.g}^{-1}$) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	87
TABELA 6A Resumo da análise de variância para teor de fósforo orgânico (Po) em folhas apicais de <i>E. grandis</i> ($\mu\text{g.g}^{-1}$) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	87
TABELA 7A Resumo da análise de variância para atividade da fosfatase ácida em folhas apicais de <i>E. grandis</i> (mU) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	88

	Página
TABELA 8A Resumo da análise de variância para teor de fósforo extraído pelos extratores Mehlich-1 e Resina ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$), e pH no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	88
TABELA 9A Resumo da análise de variância para teor de fósforo total (Pts) em folhas apicais de <i>E. grandis</i> ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.....	89

TABELA 1A. Resumo da análise de variância para produção de matéria seca da parte aérea (g.vaso^{-1}) de *E. grandis* cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	17560,7585**
Tipo de solo	1	4215,1474**
Doses (solo)	10	24,6700*
Época x solo	2	468,1876**
Época x doses (solo)	20	20,9989*
Épocas x doses de Si:LE	(17)	1420,9822**
Regressão	2	11847,8900**
Desvio de regressão	15	13,3944NS
Épocas x doses de Si:C	(17)	740,1702**
Regressão	2	6188,4500**
Desvio de regressão	15	13,7329NS
Resíduo	108	12,0313
Média Geral		25,22
C.V.%		13,74

NS, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste de F.

TABELA 2A. Resumo da análise de variância para conteúdo de fósforo na matéria seca da parte aérea (mg.vaso^{-1}) de *E. grandis* cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	3519,9744**
Tipo de solo	1	1254,93063**
Doses (solo)	10	25,6266*
Época x solo	2	84,7043**
Época x doses (solo)	20	28,1176**
Épocas x doses de Si:LE	(17)	240,0389**
Regressão	3	1245,6783**
Desvio de regressão	14	24,5447NS
Épocas x doses de Si:C	(17)	232,6328**
Regressão	4	912,4505**
Desvio de regressão	13	13,7329NS
Resíduo	108	13,5241
Média Geral		23,37
C.V.%		15,73

NS, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste de F.

TABELA 3A. Resumo da análise de variância para conteúdo de silício na matéria seca da parte aérea (mg.vaso^{-1}) de *E. grandis* cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	13,6533**
Tipo de solo	1	558,6526**
Doses (solo)	10	38,4789**
Época x solo	2	54,7486**
Época x doses (solo)	20	4,08634**
Épocas x doses de Si:LE	(17)	24,7086**
Regressão	3	113,8923**
Desvio de regressão	14	3,2407NS
Épocas x doses de Si:C	(17)	11,6505**
Regressão	3	51,9013**
Desvio de regressão	14	3,0234NS
Resíduo	108	1,9245
Média Geral		7,48
C.V.%		18,52

NS, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste de F.

TABELA 4A. Resumo da análise de variância para teor de silício solúvel no LE e no C (mg.dm^{-3}) em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	3303,5361**
Tipo de solo	1	7950,9916**
Doses (solo)	10	207,1876**
Época x solo	2	194,3433**
Época x doses (solo)	20	10,6392**
Épocas x doses de Si:LE	(17)	408,1699**
Regressão	3	2258,4830**
Desvio de regressão	14	6,9599NS
Épocas x doses de Si:C	(17)	138,3500**
Regressão	3	764,2686**
Desvio de regressão	14	4,2246NS
Resíduo	108	3,3064
Média Geral		26,72
C.V.%		6,80

NS, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste de F.

TABELA 5A. Resumo da análise de variância para teor de fósforo inorgânico (Pi) em folhas apicais de *E. grandis* ($\mu\text{g.g}^{-1}$) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	117,1088NS
Tipo de solo	1	39,2502NS
Doses (solo)	10	489,1845NS
Época x solo	2	8544,0588**
Época x doses (solo)	20	698,6385*
Épocas x doses de Si:LE	(17)	1282,1753**
Regressão	2	8333,2550**
Desvio de regressão	15	342,0318NS
Épocas x doses de Si:C	(17)	860,8448**
Regressão	2	5812,6900**
Desvio de regressão	15	200,5987NS
Resíduo	108	380,7270
Média Geral		100,60
C.V.%		19,39

NS, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste de F.

TABELA 6A. Resumo da análise de variância para teor de fósforo orgânico (Po) em folhas apicais de *E. grandis* ($\mu\text{g.g}^{-1}$) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	281,0580NS
Tipo de solo	1	16614,3506**
Doses (solo)	10	193,5701NS
Época x solo	2	3563,2667**
Época x doses (solo)	20	461,9324**
Épocas x doses de Si:LE	(17)	442,5933**
Regressão	2	2342,5415**
Desvio de regressão	15	189,2669NS
Épocas x doses de Si:C	(17)	566,3572**
Regressão	4	1760,3740**
Desvio de regressão	13	198,9675NS
Resíduo	108	194,6314
Média Geral	58,53	
C.V.%	23,83	

NS, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste de F.

TABELA 7A. Resumo da análise de variância para atividade da fosfatase ácida em folhas apicais de *E. grandis* (mU) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	985445,8582**
Tipo de solo	1	2533,1927NS
Doses (solo)	10	5708,1085*
Época x solo	2	430,4883NS
Época x doses (solo)	20	6960,5999**
Épocas x doses de Si:LE	(17)	65302,5320**
Regressão	4	258989,7500**
Desvio de regressão	13	4321,8494NS
Épocas x doses de Si:C	(17)	61988,3820**
Regressão	3	320686,2700**
Desvio de regressão	14	4981,6930NS
Resíduo	108	2699,1251
Média Geral		175,18
C.V.%		29,65

NS e **: não significativo e significativo a 1% pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 8A. Resumo da análise de variância para teor de fósforo extraído pelos extratores Mehlich-1 e Resina (mg.dm^{-3}), e pH no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	GL	Quadrado médio		
		P Mehlich-1	P Resina	pH
Épocas	2	55,9352**	4000,9652**	2,1836**
Tipo de solo	1	264,0625**	29127,1111**	24,3377**
Doses (solo)	10	0,4347NS	13,1361NS	0,02269NS
Época x solo	2	2,7708**	508,1319**	0,8269**
Época x doses (solo)	20	0,5431NS	14,4902NS	0,0152NS
Resíduo	108	0,7708	13,0138	0,0136
Média Geral		6,61	34,48	5,35
C.V.%		13,26	10,46	2,18

NS, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste de F.

TABELA 9A. Resumo da análise de variância para teor de fósforo total (Pts) em folhas apicais de *E. grandis* ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) cultivado no LE e no C em função das doses de Si e das épocas de avaliação.

Causa de variação	G.L.	Quadrado médio
Épocas	2	3631,5737*
Tipo de solo	1	37314,3269**
Doses (solo)	10	609,1255NS
Época x solo	2	8466,2201**
Época x doses (solo)	20	1340,0835NS
Resíduo	108	932,0025
Média Geral		162,27
C.V.%		18,81

NS e **: não significativo e significativo a 1% pelo teste de F, respectivamente.