

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE
CALCÁRIO E SILICATOS EM SOLOS OXÍDICOS**

ALINE DA SILVA SANDIM

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP – Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU – SP

JULHO – 2012

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CÂMPUS DE BOTUCATU

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE
CALCÁRIO E SILICATOS EM SOLOS OXÍDICOS**

ALINE DA SILVA SANDIM

Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU – SP

JULHO – 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S217d Sandim, Aline da Silva, 1988-
Disponibilidade de fósforo em função da aplicação de calcário e silicatos em solos oxídicos / Aline da Silva Sandim. - Botucatu : [s.n.], 2012
xi, 99 f. : gráfs., tabs., fots. Color.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2012
Orientador: Leonardo Theodoro Büll
Inclui bibliografia

1. Adsorção. 2. Calagem dos solos. 3. Fósforo. 4. Silicatos. 5. Silício na agricultura. I. Büll, Leonardo Theodoro. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

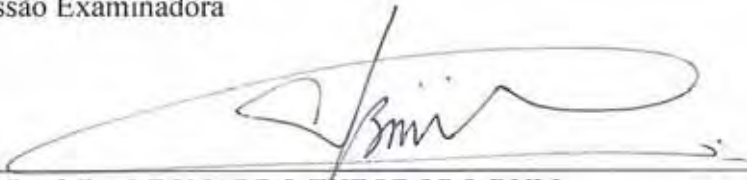
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: **DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE
CALCÁRIO E SILICATOS EM SOLOS OXÍDICOS**

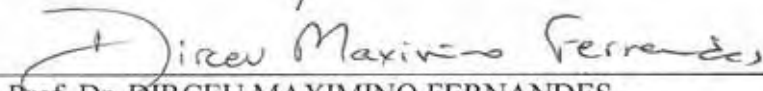
ALUNA: ALINE DA SILVA SANDIM

ORIENTADOR: PROF. DR. LEONARDO THEODORO BÜLL

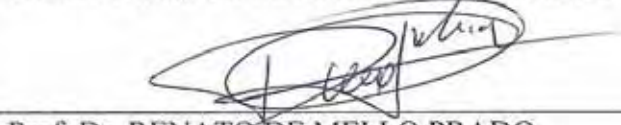
Aprovado pela Comissão Examinadora



Prof. Dr. LEONARDO THEODORO BULL



Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES



Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Data da Realização: 25 de julho de 2012.

Aos meus pais,
Ivone Maria da Silva Sandim e
Sebastião Sandim, que sempre me apoiaram
e me auxiliaram em todos os momentos dessa trajetória
e que abdicaram muitas vezes dos seus sonhos
para realizarem os meus, além do amor,
carinho e compreensão.

DEDICO

A **Danielly Cespede Firmino** (*in memoriam*)
que como um anjo em minha vida soube
me mostrar o verdadeiro valor de uma amizade.
A você que sempre estive ao meu lado e
que hoje está ao lado de DEUS

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e acima de todas as coisas, quero agradecer a DEUS por mais uma etapa conquistada em minha vida, a Ele, meu senhor, que me deu forças e me ajudou a acreditar que eu era capaz, muito obrigada;

Aos MEUS PAIS que como anjos que cuidam de nós, cuidaram de mim, me aconselharam, me amaram, me ajudaram me apoiaram, enfim a eles: “Minha vida”, pois eles são minha vida, muito obrigada;

Aos meus irmãos que são como joias em minha vida, por alegrarem meus dias, muito obrigada;

Ao professor Dr. Leonardo Theodoro Büll, por sua confiança em mim, por seus ensinamentos e sua dedicação, pois, orientador é a palavra ideal para defini-lo, porque é sob seu exemplo que guio meus passos. Muito obrigado!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelos meses de bolsa concedidos;

Aos membros da banca Dr. Leonardo Theodoro Büll, Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes e ao Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pelas valorosas sugestões e contribuições nesse trabalho;

A todos os funcionários do Departamento de Recursos Naturais / Área de Ciência do Solo, Emerson, José Carlos, Dorival, Jair, Noel, Pedrinho, Adriana Ramos, Adriana, Dpiere, Ademir, Silvinha, Selma, Maria Isabel, Susana, Martha, Daniel, Néia, Adison, Isaura, Cristiane, obrigada pelo apoio desde que cheguei na época do estágio até agora.

A uma nova amiga que fiz e uma ótima estagiária por sinal, com quem gostei muito de trabalhar, Ariane (Pudim) e ao João (Duplex) que me ajudou muito no momento de coleta de raízes.

Aos meus amigos pós-graduandos da FCA, que como anjos que DEUS colocou em minha vida, sempre me apoiaram, me fizeram sorrir, e me ajudaram tantas vezes em diversas situações, Mauricio Roberto (Marcha Lenta), Géssica Lima (Poia), Joselina Correa (Lina), Renata Coscolin (Bina), Dayanne Bressan (Day), Susiane Moura (Susi), Clarice Backes, Angélica Fernandes, Fábio Tanamati, Priscila Figueiredo, Diógenes Bardivieso, Laís Lorena e Jader Nantes.

Aos meus queridos amigos de Campo Grande, Danielly Cespede (*in memorian*), Daffnys Afonso, Rafael Simões, Karina Fagundes, Pamella Assis, Cristiano Barbosa, Leandro Amorim, Camila Meira, Thaísa Bueno, Tatiane Bueno, Amanda Meira, Nathália Dobes, Keila Mota, Lindinéia, Cleusa Cespede, José Firmino, a vocês meu muito obrigada pelo carinho e amizade.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para execução desse trabalho e a concretização de mais um sonho, muito obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO	4
4. REVISÃO DE LITERATURA	7
4.1 Formas e dinâmica do fósforo no solo	7
4.2 Influência do pH do solo na adsorção e dessorção de fósforo.....	10
4.3 Interação silício e fósforo no solo.....	14
4.4 Extratores de P no solo	17
4.5 Extratores de Si no solo	19
5. MATERIAL E MÉTODOS	22
5.1 Localização e caracterização dos experimentos	22
5.2 Delineamento experimental.....	25
5.3 Avaliações no solo.....	26
5.3.1 Determinações químicas nos solos	26
5.3.2 P remanescente	26
5.4 Avaliações na planta.....	26
5.4.1 Produção de massa seca e acúmulo de fósforo.....	26
5.4.2 Determinação do índice de cor verde	27
5.5 Análise estatística	27
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
6.1 Análises químicas dos solos	29
6.1.1 pH, V% e Al.....	29
6.1.2 CTC	32
6.1.3 Cálcio e Magnésio	34
6.1.4 Extração de P pelos métodos P resina e P mehlich 1.....	37
6.1.5 Correlação P meh e P resina no solo.....	41
6.1.6 P remanescente	43
6.1.7 Extração Si ácido acético e Si CaCl ₂	45

6.1.8 Correlação Si ácido acético e Si CaCl_2	49
6.2 Avaliação de atributos nas plantas de milho.....	51
6.2.1 Teor e acúmulo de P na planta.....	51
6.2.2 Correlação P extraído do solo e acúmulo de P na planta.....	56
6.2.3 Teor e acúmulo de Si na parte aérea	59
6.2.4 Correlação Si extraído do solo e acúmulo de Si na planta.....	63
6.2.5 Índice de cor verde (ICV)	66
6.2.6 Altura de planta e diâmetro de colmo	73
6.2.7 Matéria seca de raiz	77
6.2.2 Matéria seca da parte aérea	79
7. CONCLUSÕES	83
8. REFERÊNCIAS	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas dos solos estudados	23
Tabela 2. Análise dos materiais corretivos utilizados no experimento	24
Tabela 3. Valores de pH no solo em função da aplicação dos corretivos nos solos.....	30
Tabela 4. Valores de V%, em função da aplicação dos corretivos nos solos	31
Tabela 5. Teores de Alumínio em função da aplicação dos corretivos nos solos	31
Tabela 6. Valores de CTC no solo arenoso e argiloso, em função da aplicação dos corretivos	33
Tabela 7. Valores de CTC, em função da aplicação dos corretivos e doses de P no solo de textura média	33
Tabela 8. Teor de Ca no solo, em função da aplicação dos corretivos no solo arenoso e de textura média	34
Tabela 9. Teor de Ca no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P no solo argiloso	36
Tabela 10. Teor de Mg no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos	36
Tabela 11. Teor de P no solo, extraído por resina, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos	37
Tabela 12. Teor de P no solo, extraído por Mehlich 1, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.....	40
Tabela 13. Teor de Prem no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos	44
Tabela 14. Teor de Si em ácido acético no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.	46
Tabela 15. Teor de Si CaCl_2 no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.....	48
Tabela 16. Teor de P nas plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos	52
Tabela 17. Acúmulo de P nas plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.	54

Tabela 18. Teor de Si em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.	59
Tabela 19. Acúmulo de Si em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.	61
Tabela 20. Índice de cor verde em plantas de milho em função da aplicação de diferentes fontes de corretivos nos solos.....	66
Tabela 21. Índice de cor verde aos 30 DAE em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.....	68
Tabela 22. Índice de cor verde aos 45 DAE em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.....	70
Tabela 23. Índice de cor verde aos 60 DAE em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.....	71
Tabela 24. Altura de plantas de milho em função da aplicação de corretivos e doses de P nos solos.....	74
Tabela 25. Diâmetro do colmo de plantas de milho em função da aplicação de corretivos e doses de P nos solos.	76
Tabela 26. Matéria seca de raiz de plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.	78
Tabela 27. Matéria seca de plantas de milho em função da aplicação de corretivos e doses de P nos solos	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Visão geral do experimento aos 30 DAS	25
Figura 2. Efeito linear para teor de Ca disponível no solo RQ e LVd em função da aplicação de doses de P	35
Figura 3. Correlação entre fósforo determinado pelos métodos resina de troca iônica e Mehlich-1; a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.	42
Figura 4. Correlação entre silício determinado pelos métodos ácido acético e CaCl_2 a) solo arenoso; b) solo de textura média e c) solo argiloso, d) todos os solos.....	49
Figura 5. Correlação entre fósforo determinado pelos método resina de troca iônica e fósforo acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média e c) solo argiloso, d) todos os solos.....	56
Figura 6. Correlação entre fósforo determinado pelo método Mehlich 1 e fósforo acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.	58
Figura 7. Correlação entre silício determinado pelo extrator ác. acético e silício acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.	63
Figura 8. Correlação entre silício determinado pelo extrator CaCl_2 e silício acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.	65
Figura 9. ICV em folhas de milho aos 15 dias após a emergência; a) solo arenoso; b) solo textura média c) solo argiloso.....	67
Figura 10. ICV em folhas de milho aos 30 dias após a emergência em solo de textura argilosa.	69
Figura 11. Teor de clorofila em folhas de milho aos 60 dias após a emergência em solo de textura argilosa.	71
Figura 12. Correlação entre índice SPAD e teor de Si na parte aérea do milho aos 15, 30, 45 e 60 DAE.....	72

1. RESUMO

Partindo do princípio que a aplicação do silicato pode resultar em aumento na disponibilidade de fósforo no solo para as culturas, objetivou-se estudar a influência da silicatagem, em comparação à calagem, na dessorção de fósforo em solos com fósforo previamente adsorvido, avaliada por dois extratores e pelo crescimento da planta. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, em esquema fatorial $3 \times 3 \times 5$, constituídos por três solos, três doses de fósforo e quatro corretivos de acidez, além de um tratamento sem correção da acidez, totalizando 180 parcelas experimentais. O experimento foi realizado em casa de vegetação, em vasos de 20 L. Os solos foram submetidos a três doses de P, (0, 50 e 150 mg dm^{-3}), tendo como fonte superfosfato triplo em pó e mantidos incubados por 90 dias. Após o período de incubação foram realizadas amostragens, para análise química de rotina e determinações dos teores de P através dos métodos resina, Mehlich 1 e P remanescente. Com base nesses resultados foi realizada a aplicação dos corretivos de acidez calculando-se as doses visando a elevar a 70% o valor de saturação por bases. Os corretivos de acidez utilizados foram: calcário dolomítico, escória de aciaria, escória de aciaria forno de panela, e wollastonita. Após a aplicação dos corretivos, os solos permaneceram incubados por mais 60 dias e novas determinações dos níveis de P foram realizadas. A cultura utilizada foi o milho. Nos solos foram realizadas determinações químicas de P, demais nutrientes e Si. Na planta foram realizadas avaliações de produção de massa seca, acúmulo de nutrientes e de Si e determinação do índice de clorofila. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. As escórias aumentaram os teores de fósforo no solo,

quando comparadas ao calcário, sugerindo interação positiva entre Si e P no solo. Os extratores Mehlich 1 e Resina apresentaram altas correlações com o P extraído e o fósforo acumulado pela planta, independente do solo. Para todos os parâmetros analisados na planta, houve interação significativa entre as doses de P e os corretivos utilizados, com maiores valores para o uso de silicatos. Os teores de clorofila foram positivamente influenciados pelas doses e fontes de corretivos em todas as épocas de avaliação.

Palavras chaves: adsorção de fósforo, silicatos, calagem, interação silício e fósforo

PHOSPHORUS AVAILABILITY AS INFLUENCED BY APPLICATION OF LIME IN SOIL AND OXIDES SILICATES. Botucatu, 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

Author: ALINE DA SILVA SANDIM

Adviser: LEONARDO THEODORO BÜLL

2. SUMMARY

Assuming that the application of silicate can result in increased availability of phosphorus in the soil for crops, aimed to study the influence of silicatagem compared to lime, the desorption of previously adsorbed soil phosphorus as assessed by two extractors and the plant growth. The experimental design was randomized blocks with four replications in a factorial $5 \times 3 \times 3$, consisting of three solos, three and four doses of phosphorus lime acidity, and a treatment without liming, totaling 180 plots. The experiment was conducted in a greenhouse in pots of 20 L. The soils were subjected to three levels of P, (0, 50 and 150 mg dm^{-3}), and triple superphosphate as source powder and kept incubated for 90 days. After the incubation period was sampled for routine chemical analysis and determination of the levels of P by the methods resin, the remaining P and Mehlich 1. Based on these results was performed liming acidity calculating the doses in order to raise the value of 70% saturation. The different lime sources used were limestone, steel slag, steel slag pot furnace, and wollastonite. After liming, the soils were incubated for another 60 days and further determinations of P levels were made. The culture was maize. The soils were subjected to chemical P, Si and other nutrients in the plant were evaluated for dry matter production, nutrient accumulation and determination of Si and chlorophyll content. The data were submitted to ANOVA and treatment means were compared by Tukey test at 5% probability. The slag increased the levels of phosphorus in the soil, when compared to the limestone, suggesting positive interaction between Si and P in the soil. The Mehlich 1 and resin were highly correlated with P extracted and phosphorus uptake by plants, regardless of the soil. For all parameters analyzed in the plant, there was significant interaction between the P fertilizer and lime used, with higher values for the use of silicates. The chlorophyll levels were positively influenced by the levels and sources of lime in all evaluation periods.

Keywords: adsorption of phosphorus, silicate, lime, silicon and phosphorus interaction

3. INTRODUÇÃO

Devido ao maior intemperismo a que foram submetidos na sua formação, de maneira geral, os solos brasileiros têm baixa fertilidade natural em função da elevada acidez, baixa saturação por bases, toxicidade de alguns elementos químicos e baixa disponibilidade de nutrientes. Considerando os nutrientes para o desenvolvimento das plantas, a baixa disponibilidade de fósforo é geralmente considerada a maior limitação (Novais e Smyth, 1999). Os teores de fósforo na solução do solo, além de muito baixos, são insuficientes para suprir as necessidades de uma cultura. Particularmente, este nutriente está envolvido em processos de fixação, que podem ser permanentes para a maioria dos solos tropicais ácidos (Stefanutti et al., 1991).

O fósforo é o nutriente mais limitante para o início do desenvolvimento e crescimento das plantas. Ao contrário dos demais nutrientes, a adubação com P assume a particularidade de aplicar uma quantidade várias vezes maior do que aquela exigida pelas plantas, pois se torna necessário satisfazer a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação do P (Furtini Neto et al., 2001).

Visando a redução na quantidade recomendada de adubos fosfatados torna-se necessária a compreensão das interações do fósforo com o solo, que levam a menor disponibilidade deste nutriente para as plantas, além da possível reversibilidade dessas reações de adsorção, possibilitando assim, a máxima eficiência da adubação fosfatada.

A reação de adsorção do íon fosfato aos colóides do solo está diretamente

relacionada ao pH do mesmo, pois com a elevação do pH ocorre aumento da solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio e redução da adsorção do ânion fosfato a fase sólida do solo. Como técnica alternativa para correção de acidez do solo, pode-se utilizar o silicato de cálcio (CaSiO_3), com reações semelhantes ao calcário que, além de elevar o pH, disponibiliza o ânion silicato (H_3SiO_4^-), que concorre com o ânion fosfato pelo mesmo sítio de adsorção, saturando dessa forma o ponto onde possivelmente seria adsorvido o fósforo.

Estudos que medem a disponibilidade de P sob condições ácidas, determinações químicas como adsorção máxima de P (Vasconcellos et al. 1974, Gonçalves et al., 1985), energia de adsorção (Ernani et al. 1996), e extratores (Novais et al., 2007), etc, são consistentes ao abordar a grande influência da acidez do solo, as mudanças químicas no P no solo, causada por reações de precipitação / adsorção. O alto valor do ponto de carga zero (PCZ) do oxihidróxidos em solos tropicais, altamente afetada pela intemperismo (Mello & Novais, 2007), é a principal razão para este fato.

O extrator Mehlich⁻¹, amplamente usado no país em análises laboratoriais de rotina, é composto de fortes ácidos diluídos e pode superestimar os níveis de P disponível em solos tratados com fosfato de rocha ou em que os níveis de P inorgânico-Ca são maiores devido ao baixo intemperismo (Novelino et al., 1985). Por outro lado, pode subestimar os valores de P disponível em solos com alto teor de argila, como consequência do esgotamento do extrator em tais condições (Novais & Kamprath, 1979 Muniz et al, 1987). No entanto, o método da resina também é questionado, devido a provável subestimação do P lábil, principalmente em solos com alta capacidade de adsorção de P (Campello et al., 1994). Um estudo recente confirma este fato (Schlindwein & Gianello, 2008).

A expansão das áreas de cultivo e o esgotamento das reservas mundiais de fósforo são fatores que tendem a manter elevação constante de preço dos fertilizantes fosfatados. Nesse cenário, a busca de maior eficiência nas adubações é o caminho óbvio, justificando as pesquisas para tal. Face a gama de fatores que interagem condicionando a disponibilidade de P para as culturas, a integração das informações existentes pode levar a novas alternativas de uso e manejo de fertilizantes fosfatados.

Ressalta-se, ainda, que os fosfatos são recursos naturais não renováveis, escassos e sem sucedâneos, devendo, portanto, ter utilização eficaz (Prado e Fernandes, 1999). Neste sentido, a ciência do solo vem estudando diferentes maneiras de melhorar a eficiência da

adubação fosfatada.

Partindo do princípio que a aplicação do silicato pode resultar em aumento na disponibilidade de fósforo no solo para as culturas, pelo fato do ânion silicato ocupar os pontos de adsorção do ânion fosfato, objetiva-se estudar a influência da silicatagem, em comparação à calagem, em solos com fósforo previamente adsorvido, na dessorção de fósforo, avaliada por dois extratores e pelo crescimento da planta.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Formas e dinâmica do fósforo no solo

O fósforo no solo está desigualmente distribuído em cinco compartimentos: precipitado com alumínio, ferro ou cálcio, adsorvido aos óxidos de ferro e alumínio da fração argila, em solução, na forma orgânica ou fazendo parte de compostos marcadamente insolúveis. Esses compartimentos exibem variadas capacidades de fixação e, portanto, de liberação do nutriente disponível às raízes das plantas na solução do solo. Em função do pH, o fósforo ocorre nas formas aniônicas H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , ou PO_4^{3-} (Novais & Kamprath, 1979; Bahia Filho, 1982; Raij, 1991). Em solos tropicais, em função do pH normalmente encontrado, o fósforo ocorre quase que exclusivamente como ânion ortofosfato (H_2PO_4^-), derivado do ácido ortofosfórico (H_3PO_4).

A deficiência de P nos solos tropicais é intensa graças à elevada acidez e a presença de grandes proporções de argila sesquioxídica, o que aumenta muito a adsorção de fosfatos e a formação de precipitados com Fe e Al, reduzindo, conseqüentemente, a disponibilidade de P para as plantas (Sanchez; Salinas, 1981). Em função da energia que o P está associado com a fase sólida do solo, somente uma parte do P total está em equilíbrio relativamente rápido com o P da solução e pode ser utilizada pelas plantas durante seu ciclo de desenvolvimento. Esta fração do P total é denominada lábil e é estimada através de extratores na análise do solo.

A quantificação da relação P na solução/ P na fase sólida pode ser obtida, em laboratório, por meio de isotermas de adsorção. Em geral, quanto maior o teor de argila, maior a quantidade de P retida na fase sólida e, conseqüentemente, o teor de P na solução do solo será menor (Sousa & Lobato, 2003).

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). A maior adsorção de fósforo ocorre em solos ricos em goethita em relação à hematita, e isso pode ser explicado em parte pelo tamanho da goethita em relação à hematita (Bahia Filho et al., 1983; Souza et al., 1991). Diversos autores demonstraram que, em solos ácidos, os óxidos de ferro da fração argila são os principais responsáveis pela adsorção de fósforo em detrimento de outros minerais, como a gibbsita e a caulinita (Hingston et al., 1972; Bahia Filho, 1982; Souza et al., 1991; Curi, 1993).

Adsorção é um termo genérico que indica reações químicas e mesmo físicas que ocorrem em interfaces (superfícies de separação de duas fases). A superfície (óxidos, por exemplo) é chamada adsorvente. A substância (íons fosfato, no caso) é chamada adsorvato. A superfície muitas vezes é porosa, ou mostra imperfeições ou microporos, permitindo a difusão do adsorvato em seu interior, dando continuidade as reações.

A reação de adsorção de fósforo à superfície dos minerais de argila (óxidos de ferro e alumínio) é um processo de troca de ligantes do complexo de superfície em que hidroxilas e/ou moléculas de água 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).

A retenção de fósforo adicionado ao solo, em formas lábeis ou não, ocorre tanto pela precipitação do P em solução com formas iônicas de Fe, Al e Ca, como, principalmente, de maneira mais significativa, pela sua adsorção pelos oxidróxidos de Fe e de Al, presentes, de modo geral, em maiores quantidades em solos tropicais mais intemperizados, de modo particular nos mais argilosos. Reação semelhante a apresentada pelos oxidróxidos de Fe ocorre, também, com os oxidróxidos de Al (Higston et al., 1974; Parfitt 1978; Sanchez & Uehara, 1980; Bahia Filho, 1982; Resende, 1983; Sanyal & De Datta, 1991).

O P inicialmente adsorvido a superfície de agregados de solo difunde-se, com o tempo, para seu interior. É um processo lento, que pode levar anos para atingir o equilíbrio,

devendo ser, também, responsável pela diminuição da disponibilidade de P de um solo recém fertilizado, com o aumento do tempo de contato do P de um solo (Barrow, 1985).

Precipitação é a reação entre íons, com a formação de uma nova fase ou composto definido. É um processo tridimensional, ao contrário da adsorção, que é bidimensional (Sposito, 1984). Todavia, segundo esse autor, esses dois mecanismos de retenção de P pelo solo são de difícil distinção e ambos são descritos pelo mesmo modelo matemático. É a reação de P as formas iônicas de Al e de Fe em solos ácidos ou a Ca^{2+} em solos neutros ou calcários, formando compostos de composição definida e poucos solúveis (Sample et al., 1980).

A precipitação de P em solos torna-se particularmente importante durante a dissolução de grânulos de fertilizantes fosfatados, ultrapassando os produtos da solubilidade de componentes da reação solo-fertilizante (atividade das espécies fosfatadas e dos íons metálicos) (Sample et al., 1980). Isotermas de solubilidade de compostos fosfatados, tomando H_2PO_4 (fração solubilizada) em função de pH (condicionante de solubilização), mostram, por exemplo, que fosfatos de Al (variscita) e de Fe (estrengita) são mais estáveis em meio ácido (têm a solubilidade aumentada com aumento do pH do meio), ao passo que fosfatos de Ca, pelo contrário, são menos estáveis em meio ácido (diminuem a solubilidade com o aumento do pH) (Olsen & Khasawneh, 1980).

Alumínio em solução (semelhantemente, íons de Fe) pode causar precipitação de fosfatos adicionados ao solo. Para evitar essa reação, deve-se “eliminar” (precipitar) o Al^{+3} por calagem anterior a adição da fonte de P. Solos com pH mais elevado, com muito Ca trocável, natural ou como consequência de uma supercalagem, podem ter a precipitação de fosfatos adicionados ao solo (Sample et al., 1980), fenômeno denominado “retrogradação” por Malavolta (1967).

O produto “insolúvel” formado é uma forma de P-Ca de menor disponibilidade para as plantas que o P-Al formado em condição ácida. Por outro lado, o P é adsorvido em CaCO_3 em menor quantidade relativa e com menor energia do que em oxidróxidos de Fe e de Al (Sample et al., 1980; Solis & Torrent, 1989).

Os solos das regiões tropicais úmidas, devido ao processo de intemperização, apresentam riqueza de sesquióxidos de ferro e alumínio, os quais podem se apresentar com cargas positivas e, conseqüentemente adsorver o ânion fosfato em suas superfícies.

A reação dos fertilizantes fosfatados com o solo depende do pH, da textura e da natureza dos colóides (Pereira & Faria, 1998).

Solos bem drenados frequentemente apresentam baixa disponibilidade de fósforo devido à tendência deste elemento formar compostos estáveis de alta energia de ligação e baixa solubilidade com a fase sólida mineral do solo, principalmente com óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Tisdale et al., 1995). Já em ambientes sazonalmente alagados, como os solos de várzea onde se cultiva o arroz irrigado, existe uma alternância nas condições de oxidação e redução, a qual determina modificações intensas na fase sólida mineral do solo e na dinâmica de elementos altamente reativos como o fósforo.

Com o alagamento do solo durante o cultivo do arroz, o ambiente químico e biológico é profundamente alterado em relação ao anteriormente oxidado. Nessa condição, após o consumo do oxigênio molecular, microrganismos anaeróbios passam a utilizar compostos oxidados do solo como receptores de elétrons. A partir destas reações de oxi-redução, modificam-se os valores do pH e aumenta a disponibilidade de vários elementos (Ponnamperuma, 1972). O Fe^{+3} e Mn^{+4} da superfície dos óxidos passam para forma de Fe^{+2} e Mn^{+2} , respectivamente, aumentando sua concentração na solução do solo (Vahl, 1991). O fósforo, em função da adsorção específica na superfície dos óxidos, tem sua dinâmica bastante alterada, podendo ser liberado para a solução do solo na medida que há redução do Fe da sua estrutura (Vahl, 1999).

4.2 Influência do pH do solo na adsorção e dessorção de fósforo

A acidificação dos solos ocorre de modo especial, em regiões tropicais úmidas e deve-se à substituição de cátions trocáveis por íons H^+ e Al^{+3} no complexo de troca, absorção de cátions básicos pelas plantas e, também, pelo uso de fertilizantes de caráter ácido. O Al em concentração elevada, além de ser tóxico às plantas, pode interferir na disponibilidade de outros nutrientes, principalmente na solubilidade do fosfato no solo, que tende a reagir com o Al solúvel, formando fosfatos de Al de baixa solubilidade em solos ácidos. Existem evidências de que a disponibilidade de P em solos ácidos altamente intemperizados é governada, principalmente, pelo fosfato ligado a alumínio, que aparentemente é a forma mais lábil de P no solo (Novais & Smyth, 1999), comparando-se às demais formas no solo.

Dentre os atributos do solo o pH, índice que indica o grau de acidez ativa do solo, talvez seja, isoladamente, o mais relevante, no que se refere a utilização de fertilizantes. De maneira especial, a disponibilidade de nutrientes contidos no solo, ou a ele adicionado por meio das adubações, é bastante variável em função do pH do solo (Malavolta et al., 1997). Assim, a calagem prévia dos solos ácidos, além de proporcionar aumento do pH e da saturação por bases, promove a neutralização do alumínio e de grande parte do ferro e do manganês, aumentando a atividade biológica e a eficiência dos fertilizantes, resultando ainda em diminuição na capacidade de fixação via precipitação do P, favorecendo, conseqüentemente, o desenvolvimento vegetal (Ernani et al., 1996).

A calagem é uma prática fundamental para reduzir as perdas pela fixação do fósforo por Fe e Al, como também reduzir a acidez do solo, propiciando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das plantas. Segundo Prochnow et al (2004), de forma geral, a disponibilidade de P é maior em solos com pH na faixa de 5,5 a 7,0. É uma prática comum para elevar o pH do solo e aumentar a biodisponibilidade de fósforo (P) nas regiões tropicais. Todavia, o efeito da calagem na adsorção e biodisponibilidade de fósforo tem sido relatado de forma controversa. A dessorção de fósforo é um processo mais importante do que a adsorção para definir a biodisponibilidade de fósforo. Apesar disso, poucos estudos sobre a relação entre pH do solo e dessorção de fósforo são disponíveis, sobretudo nos solos tropicais (Sato & Comerford, 2005).

Em regiões tropicais, a calagem é freqüentemente usada para elevar o pH do solo e aumentar a biodisponibilidade de fósforo (Sanchez & Uehara, 1980). No entanto, resultados publicados sobre o efeito da calagem sobre a sorção P e biodisponibilidade são conflitantes (Haynes, 1982). Tem sido demonstrado que a adsorção de fósforo houve tanto diminuição (Ernani et al., 1996) quanto aumento, com a elevação do pH. Ainda outros não mostraram influência significativa do pH (Arias & Fernandez, 2001).

A aplicação superficial de calcário e de adubos, o não-revolvimento do solo e a manutenção do solo constantemente coberto por plantas ou seus resíduos alteram a dinâmica de nutrientes, especialmente de P e de Ca, provocando aumento nas suas concentrações na camada superficial do solo. Além disso, o aumento de pH do solo, pela calagem, aumenta as cargas negativas e diminui as positivas no complexo de troca e diminui a solubilidade de compostos de Al e de Fe, aumentando a concentração de P na solução do solo (Ernani et al., 1996).

A calagem realizada em três solos ácidos do sul do Brasil mostrou aumento da absorção de P até um pH de 5,0 em que a adsorção de P diminuiu (Anjos & Rowell, 1987). Elevação do pH de um Latossolo com um pH inicial de 4,5, diminuiu a adsorção de P de 18 para 24% (Smyth & Sanchez, 1980). Os autores atribuíram que a adsorção de P reduziu devido a um aumento da concentração hidroxila e a concorrência entre íons hidroxila e fosfato de adsorção específica em superfícies minerais. Haynes (1982) acrescentou que a superfície do mineral tornou-se cada vez mais negativa com o aumento do pH, resultando em maior repulsão eletrostática e diminuição da sorção de P diminuiu.

Uma das alternativas para corrigir os solos ácidos seria o uso da escória de siderurgia, um resíduo da indústria do aço e ferro-gusa, constituída quimicamente de um silicato de cálcio (CaSiO_3) com propriedade corretiva da acidez do solo semelhante à do calcário. As escórias básicas de siderurgia podem ser utilizadas como corretivos de solo e como fonte de Si e outros nutrientes. São constituídas principalmente de silicatos de Ca e Mg, podendo conter impurezas, tais como: P, S, Fe, Zn, Cu, B, Mo, Co e outros. Os silicatos comportam-se de maneira similar aos carbonatos no solo e são capazes de elevar o pH, neutralizando o Al trocável e outros elementos tóxicos (Alcarde, 1992). Entretanto, a escória apresenta liberação mais lenta de nutrientes, quando comparada ao calcário (Prado & Fernandes, 2000).

No Hawaii, Khalid et al. (1978) aplicaram um silicato em diferentes condições de acidez do solo (pH = 5,5; 6,0 e 6,5) em sistema de rotação de culturas (cana de açúcar, milho e capim desmodium). Os autores constataram que houve efeito residual significativo do silicato no solo (teores de Si), após 56 meses, sendo maior na dose mais elevada. É possível que o maior efeito residual dos silicatos no solo, com o uso da escória, seja devido a um equilíbrio químico, ou seja, com a solubilização da escória, obtém-se um incremento inicial do valor pH e da concentração de Ca. Esse aumento pressupõe decréscimos na dissolução da escória, uma vez que a solubidade desse material em solução aquosa diminui com o aumento do pH e da concentração de Ca da solução (Kato & Owa, 1996).

Analisando um Latossolo Roxo e um Nitossolo adubados com termofosfato magnésiano (aproximadamente 11% de Si na forma de MgSiO_3) cultivados com arroz, Baldeon (1995) demonstrou que o ganho em P pelas plantas foi devido ao somatório de dois efeitos: o poder alcalinizante do Si e a competição Si x P pelos mesmos sítios de adsorção dos solos. Vale ressaltar que o Si, na forma de silicato de Ca ou de Mg e em doses elevadas como no

trabalho de Roy et al. (1971), foi aplicado ao solo antes da fertilização fosfatada, à semelhança da prática da calagem. Portanto, a maior disponibilidade de P pode ter ocorrido mais por influência do incremento do pH do que pela competição entre Si e P pelos mesmos sítios de adsorção. Além disso, os referidos trabalhos utilizaram gramíneas como plantas indicadoras, reconhecidas como acumuladoras de Si em seus tecidos (Marschner, 1995). Neste caso, não se pode descartar também o papel nutricional do elemento, mascarando ou confundindo-se na planta com os benefícios do P dessorvido do solo pelo Si.

Considerando-se o alto custo unitário dos fertilizantes fosfatados, torna-se necessário assegurar sua máxima eficiência, por meio da determinação das doses mais adequadas. Além disto, técnicas como a correção da acidez do solo com silicatos podem aumentar a eficiência da adubação fosfatada, pelo fato de o ânion H_3SiO^-4 liberado por este corretivo concorrer pelo mesmo sítio de adsorção que o ânion fosfato (H_2PO^-4), contribuindo, assim, para reduzir seu grau de fixação pelo solo (Leite, 1997).

A maioria das pesquisas desenvolvidas no Brasil com a escória analisou apenas seu efeito corretivo e como fonte de alguns nutrientes presentes na sua constituição (Gomes et al., 1965; Fortes, 1993; Piau, 1995). No entanto, são escassos os trabalhos que avaliaram o efeito destes resíduos no P disponível do solo. Tratando-se de um produto conhecido como corretivo de acidez, torna-se difícil afirmar se os ganhos na redução da adsorção do P são uma ocorrência apenas do incremento do pH ou do efeito do silicato em deslocar ou saturar os sítios de adsorção de P do solo. Há, portanto, a necessidade de isolar o efeito do pH do efeito do silicato.

Quando adubos fosfatados são aplicados ao solo, depois de sua dissolução, grande parte do P é retido na fase sólida, formando compostos menos solúveis, e parte do P é aproveitada pelas plantas. A magnitude dessa recuperação depende principalmente da espécie cultivada, e é afetada pela textura, tipos de minerais de argila e acidez do solo. Além disso, a dose, a fonte, a granulometria e a forma de aplicação do fertilizante fosfatado também influenciam nesse processo (Souza et al., 2004).

O P liberado dos fertilizantes passa para a solução do solo e em seguida para a fase sólida, convertendo-se inicialmente em fósforo lábil e, com o tempo, passando a formas não-lábeis, as quais não seriam passíveis de aproveitamento imediato pelas plantas (P não-disponível). No caso de solos ácidos, o fósforo pode ser removido da solução do solo via adsorção

por ligações covalentes de alta energia com a superfície de argilas e óxidos hidratados de ferro e de alumínio. Reações de precipitação com íons de Al, Fe e Ca presentes na solução, formando compostos de solubilidade variável, seriam outros processos de indisponibilização do P fornecido na adubação. O nutriente pode, ainda, passar a fazer parte de compostos orgânicos. O P orgânico ocorre em teores variáveis, associados ao conteúdo de matéria orgânica do solo. A adsorção e a precipitação constituem os mecanismos relacionados ao fenômeno genericamente referido como fixação do fósforo pelo solo. Em geral, quanto maior a acidez, o teor de argila e, principalmente, quanto maior a presença de óxidos de Fe e Al na fração argila, mais intenso é o processo de fixação nos solos dos trópicos (Sample et al., 1980; Sanchez; Uehara, 1980; Malavolta, 1981; Lopes, 1983; Raij, 1991; Tisdale et al., 1993; Novais; Smyth, 1999).

A eficiência da adubação fosfatada em solos tropicais normalmente é muito baixa. A explicação para este fato relaciona-se com a forte tendência do P aplicado ao solo de reagir com substâncias formando compostos de baixa solubilidade – Fixação do Fósforo. Portanto, ao contrário dos demais nutrientes, a adubação com P assume a particularidade de aplicar uma quantidade várias vezes maior do que aquela exigida pelas plantas, pois, antes de mais nada, torna-se necessário satisfazer a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação do P (Furtini Neto et al, 2001).

Os solos podem apresentar de 100 a 2.500 kg ha⁻¹ de P total, na camada de 0 a 20 cm. Todavia, qualquer que seja a natureza do solo, a concentração de P em solução é extremamente baixa, normalmente entre 0,1 a 1,0 kg ha⁻¹, dado a elevada tendência de remoção do P da solução, tanto por precipitação quanto por adsorção com compostos de Al, Fe e Ca (Furtini Neto et al, 2001). Em nossos solos a fixação de fósforo pelo Ca é desprezível devido ao seu caráter ácido. Após sua dissolução, praticamente todo o P é retido na fase sólida, formando compostos menos solúveis (Martinhão et al, 2004), gerando um grande problema na agricultura brasileira, que é a baixa eficiência da adubação fosfatada.

4.3 Interação silício e fósforo no solo

O P no solo tem sido amplamente estudado, em relação aos métodos de amostragem de terra, melhores extratores de P, fontes eficientes, e modos de aplicação do P ao solo. Além disso, uma das formas para aumentar a eficiência da fertilização fosfatada seria a

utilização de ânions (silicatos) competidores com fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do solo (Fassbender, 1987).

O silício está presente na solução do solo na forma pouco dissociada, porém sujeita a interagir ativamente com o complexo sortivo. Vários minerais do solo são capazes de adsorver silício, entre eles as diversas formas de sílica cristalina e amorfa, silicatos e substâncias não-silicosas como óxidos de ferro, alumínio e magnésio, indicando a importância desses processos de adsorção para a química do silício no solo (McKeague & Cline, 1963).

A capacidade de liberação de silício para a solução de um solo é influenciada pela quantidade de sesquióxidos, os quais retém SiO_2 e pelo grau de intemperismo do solo, mostrando que essa quantidade é diretamente dependente da estabilidade dos minerais da fase sólida. Meyer & Keeping (2001) relataram correlação positiva entre os teores de silício e de argila no solo.

A correção da acidez do solo com silicatos, além de elevar o pH, pode disponibilizar o P, pelo efeito adicional de deslocar o P adsorvido para a solução (Volkweiss; Raij, 1976). A interação silício fósforo em um Cambissolo demonstrou otimizar o ganho em fósforo pelas plantas, quando o silício foi aplicado no solo numa etapa posterior à adubação fosfatada (Carvalho, 1999).

Prado e Fernandes (2001) observaram que a aplicação de escória de siderurgia incrementou os níveis de P disponível do solo, ao passo que a aplicação de calcário não apresentou uma relação significativa. Esta falta de relação da aplicação do calcário e do P disponível do solo foi também observada por Haynes (1992). Ressalta-se, ainda que tanto o calcário como a escória apresentaram um efeito semelhante na redução da acidez potencial e na elevação da saturação por bases do solo. Entretanto, percebe-se a influência positiva da escória de siderurgia na concentração de fósforo disponível do solo.

A maior eficiência da escória sobre o calcário no aumento de P disponível do solo relatado na literatura deve-se mais ao efeito do silicato contido na escória, exercendo uma competição dos ânions de silicato como P pelos mesmos sítios de adsorção, do que ao efeito do pH propriamente dito.

Em solos de textura e idade variadas do Estado de São Paulo, Raij & Camargo (1973) verificaram os menores valores de Si solúvel no Latossolo fase arenosa, e os maiores valores num Nitossolo, atribuindo a referida observação à reduzida porcentagem de argila

no Latossolo, aliada à menor superfície específica total para o Argissolo, menos intemperizado e mais argiloso. Os autores verificaram ainda, teores de Si extraível com CaCl_2 $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$ variando de 1 a 43 mg dm^{-3} , sendo os valores maiores encontrados nos solos mais argilosos e havendo também uma relação inversa com o grau de intemperismo. Um dos fatores mais estudados e que interfere na solubilidade do silício no solo, em condições aeróbicas, é o pH. A adsorção de silício monomérico por hidróxidos de ferro e alumínio recém-precipitados e por argilas de um Latossolo aumenta com a elevação do pH de 4,0 até 9,0 (McKeague & Cline, 1963).

Em um Latossolo foi verificada redução na retenção de fósforo de 18% e 24%, após a aplicação de CaCO_3 e CaSiO_3 , respectivamente, além de aumento na capacidade de troca de cátions do solo (Smyth & Sanchez, 1980). Baldeon (1995), ao estudar a ação alcalinizante e a competição Si x P na eficiência do termofosfato magnésiano, observou a superioridade do termofosfato em relação ao superfosfato triplo com e sem corretivo, na produção de massa seca da parte aérea das plantas. Este resultado foi atribuído à competição Si x P combinada com a ação alcalinizante do termofosfato.

Fosfato e silicato são retidos (adsorvidos) pelos óxidos de ferro e de alumínio da fração argila, podendo assim competir entre si pelos mesmos sítios de adsorção, ou seja, silicato pode deslocar fosfato previamente adsorvido, e vice-versa, das superfícies oxídicas (Obihara & Russel, 1972; Oliveira, 1984; Leite, 1997). Após alcalinização do solo pelo CaSiO_3 há formação do H_4SiO_4 , o qual transforma-se em H_3SiO_4^- e adsorve-se aos óxidos de ferro e alumínio da fração argila, impedindo ou dificultando a adsorção de fosfato (H_2PO_4^-) que, desta maneira, torna-se mais disponível na solução do solo (Hingston et al., 1972).

A aplicação de silicato finamente moído (escórias) antes da fosfatagem em solos cultivados com plantas acumuladoras de Si é prática comercial em diversas partes do mundo visando, entre outros benefícios, a correção de acidez (elevação de pH) e a competição Si x P no solo para melhorar a disponibilidade de P às plantas (Roy et al., 1971; Tisdale et al., 1985). Aplicações de silicato após a fosfatagem em condições de laboratório (Oliveira, 1984; Leite, 1997) ou de casa de vegetação permitem isolar o "efeito competição" do "efeito pH" desde que este último permaneça constante durante a fase experimental e que a planta indicadora utilizada não seja acumuladora de Si (Carvalho et al., 2000). Há evidências de que um vegetal só acumula Si por necessidade metabólica ou nutricional (Emadian & Newton, 1989; Belanger et al., 1995) e,

neste caso, o benefício do P dessorvido no solo pelo Si poderia confundir-se na planta com um provável efeito nutricional do Si acumulado.

A aplicação de CaSiO_3 em solos ácidos do Havaí (EUA), cultivados com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), reduziu a quantidade de fertilizante fosfatado necessária para manter o fósforo em $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ em solução. O decréscimo na adsorção de fósforo variou de 9 a 47%. Leite (1997) pesquisou a interação Si-P em Latossolo Roxo sob condições de laboratório e casa-de-vegetação com sorgo (*Sorghum bicolor*). Em laboratório constatou deslocamentos de P por Si e vice-versa, chegando a sugerir a inclusão de fontes de Si em programas de adubação com P em Latossolos, especialmente aqueles com baixos teores de Si disponível (solúvel).

4.4 Extratores de P no solo

A análise química de um solo é a principal ferramenta para obtenção de informações sobre sua fertilidade, e a determinação do teor de P disponível uma das principais análises utilizadas para a recomendação de adubação fosfatada. A avaliação da disponibilidade de P em um solo é complexa, porque esta é resultante da ação integrada dos fatores Intensidade (I), Quantidade (Q) e Capacidade Tampão (FCP). O valor I refere-se à concentração do nutriente na solução do solo, o Q à quantidade do nutriente que está adsorvida e, ou, precipitada, mas em equilíbrio com I, e o FCP é a medida da resistência que tem o solo para deixar variar o valor de I (Alvarez V., 1996). Os teores de P disponível do solo nas análises químicas feitas nos laboratórios de rotina do Brasil dão uma ideia apenas do valor Q, de modo que, para a correta interpretação da disponibilidade de P, é necessário o conhecimento do FCP do solo, estimado a partir de características do solo que se correlacionam com esta propriedade, como teor de argila e P remanescente, principalmente quando se usam extratores sensíveis ao FCP, como o Mehlich-1 (Novais & Smyth, 1999; Oliveira et al., 2000).

A disponibilidade de P do solo normalmente tem sido avaliada pelo uso de extratores químicos e pela resina de troca iônica (Fixen & Grove, 1990). Para que um extrator de P seja considerado adequado, é necessário que o teor de P por esse extrator correlacione-se com o conteúdo de P na planta (Alvarez V., 1996). No Brasil, os extratores mais utilizados são o Mehlich-1 e a resina de troca iônica, sendo apenas o primeiro sensível ao FCP (Gjorup et al., 1993; Silva & Raij, 1996; Novais & Smyth, 1999; Oliveira et al., 2000).

O extrator de Mehlich 1 ou duplo ácido ou Carolina do Norte, segundo Volkweiss & Raij (1977), baseia-se no princípio da dissolução de minerais contendo P e/ou deslocamento de P retido nas superfícies sólidas do solo para a solução, por ânions capazes de competir com o P pelos sítios de retenção. Para Lopes et al. (1982), o extrator de Mehlich 1 vem se apresentando razoavelmente adequado como indicador da disponibilidade de P em solos sem adubação e com aplicação de adubos fosfatados solúveis.

Esse extrator tem recebido críticas, principalmente por sua capacidade de extrair excessivamente o P-Ca em solos menos intemperizados ou em solos mais intemperizados (pobres em P-Ca) que receberam aplicações recentes de fosfatos naturais (Kaminski & Peruzzo, 1997), bem como pela baixa extração de P em solos argilosos, de modo especial naqueles com pH mais elevado e com alto FCP, em razão de seu poder de extração ser exaurido pelo próprio solo (Bahia Filho et al., 1983; Novais & Smyth, 1999).

Estudo de correlação para métodos de P disponível para as plantas, em 40 solos do Estado do Rio Grande do Sul, e os extratores Bray, Olsen, Morgan (modificados) e Mehlich 1, mostrou que os quatro extratores foram eficientes e similares na avaliação da disponibilidade de P, sendo o Mehlich 1 o método que melhor estimou o P nativo (Anghinoni & Bohnen, 1974).

Para Raij et al. (1984), o método Mehlich 1 está entre os métodos ácidos de extração de P que apresentam grande vantagem para uso rotineiro, principalmente porque permite obter extratos límpidos que decantam facilmente, dispensando a filtração das suspensões de solo. Todavia, segundo esses autores, é possível que o uso de extratores ácidos, nas condições brasileiras, torne-se pouco utilizado no futuro, por duas razões principais: 1) com o possível uso crescente de fosfatos naturais, o uso de extratores ácidos como o Mehlich 1, que dissolvem apatita, superestimariam os teores de P disponível; e 2) em solos adubados é de se esperar que a reserva de P lábil encontre-se em grande parte na forma de fosfatos de Al e Fe, principalmente se os solos forem ácidos, sendo preferível, então, extratores ou métodos que tenham maior ação sobre esta fração, como é o caso dos métodos Bray, da Resina e mesmo do método Olsen.

O método da Resina trocadora de ânions foi proposto por Amer et al. (1955), como uma tentativa de reproduzir em laboratório o processo de absorção de P pelas plantas no campo. O processo de extração da resina de troca iônica, conforme utilizada atualmente no Brasil (Raij et al., 2001), tem com princípio a remoção contínua do P da solução pela troca com

o bicarbonato da resina, criando um gradiente de concentração que força a dessorção do P da superfície dos coloides e a dissolução do P de precipitados, até que seja alcançado um equilíbrio eletroquímico entre o solo ou precipitado e a resina (Skogley & Dobermann, 1996).

Em uma ampla revisão bibliográfica sobre métodos de extração de P feita por Raij (1978), ficou demonstrado que o método mais eficiente para o P, em uma grande variedade de condições, é o baseado na extração da resina trocadora de ânions. A resina não tem seu poder de exaustão alterado em presença de material de solos com maior fator capacidade, e não subestimam, assim, o P lábil, e não é sensível às formas não lábeis, como as de P-Ca. Este método, porém, é mais complexo que os demais, e necessita de longo período de extração (16 horas), separação da resina e extração do P da resina (Raij, 1992). Por outro lado, apresenta melhor correlação com respostas à adubação fosfatada, analogia com extração da planta muito superior aos dos outros métodos, além de não incluir nenhum agente químico de ação específica sobre os fosfatos do solo (Raij et al., 1982, 1984).

Um dos inconvenientes do método da Resina é o fato de ser um método trabalhoso. Todavia, valem esforços para a sua utilização, pois apresenta melhor correlação com respostas à adubação fosfatada, analogia com a extração da planta muito superior aos outros métodos, além do aspecto positivo de não incluir nenhum agente químico de ação específica sobre os fosfatos do solo (Raij et al., 1982 e 1984).

4.5 Extratores de Si no solo

Apesar de o silício ser um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre e presente em consideráveis quantidades na maioria dos solos, várias classes de solos, principalmente os localizados no Cerrado, são pobres em Si solúvel nos horizontes superiores (Raij & Camargo, 1973). Solos tropicais e subtropicais, principalmente os oxídicos, tendem a apresentar baixos teores de Si trocáveis na solução do solo, podendo ser de 5 a 10 vezes menores que os encontrados nas regiões temperadas (Otsubo & Coutinho 2001). Nessas condições, provavelmente, pode-se esperar resposta para aplicação de Si em forma de fertilizantes, principalmente em plantas acumuladoras de Si, como é o caso da maioria das gramíneas.

A adequada nutrição das plantas com Si tem sido associada ao aumento da resistência ao ataque de patógenos e da produtividade e qualidade dos produtos agrícolas,

principalmente em espécies acumuladoras do nutriente, como o arroz, o sorgo e o milho, dentre outras (Lima Filho et al. 1999).

Apesar da importância do nutriente para a nutrição de plantas, a análise de Si no solo não é rotina em laboratórios no Brasil, o que pode ser atribuído, dentre outros fatores, à falta de correlação dos métodos para Si, e tem dificultado, também, o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao nutriente (Camargo et al. 2005).

Atualmente, os métodos empregados para avaliar a disponibilidade de Si às plantas utilizam soluções extratoras, como o ácido acético 0,5 mol L⁻¹ (Snyder 2001) e o CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (Berthelsen et al. 2002). As soluções mais eficientes são as ácidas, em comparação às soluções neutras. No entanto, em algumas situações, os extratores ácidos resultam na superestimativa dos teores de Si solúvel (Sumida 2002), o que tem sido relacionado, dentre outros fatores, ao pH da solução extratora.

O ácido monossilícico (H₄SiO₄) é a forma absorvida pelas plantas (Jones e Handreck, 1967), sendo predominante na solução do solo em pH menor que 7,0. A concentração de SiO₂ extraível nos solos varia de menos de 1 até mais de 100 mg dm⁻³ (Raven, 1983) em função dos teores de argila (Raij e Camargo, 1973), dos teores de óxidos de ferro e alumínio (Freitas et al., 1977) e do pH (Beckwith e Reeve, 1963; Mc Keague e Cline, 1963).

Como as concentrações de silício solúvel no solo e extraível são influenciadas pelo pH, o manejo químico do solo poderia afetar sua solubilidade e disponibilidade às plantas. Poucos trabalhos tratam da relação entre o pH e o silício solúvel em extratores em solos tropicais. O pH do solo é um fator importante, pois pode ser alterado com o manejo dos solos, enquanto os outros são intrínsecos de cada tipo de solo. A disponibilidade de silício às plantas é avaliada por meio de soluções extratoras como o ácido acético 0,5 mol L⁻¹ (Snyder, 2001; Korndörfer et al., 1999), o CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ (Berthelsen et al., 2002) e solução-tampão acetato a pH 4 (Sumida, 2002). As soluções mais eficientes são as ácidas em comparação às soluções neutras (Beckwith e Reeve, 1963) e, em algumas situações, podem superestimar os resultados (Sumida, 2002; Xu et al., 2001). Isso está relacionado, dentre outros fatores, ao pH da solução extratora que pode influenciar a concentração de silício solúvel.

A forma extraível é representada pelo silício de estabilidade intermediária, normalmente proveniente de componentes amorfos ou pouco cristalizados do solo. Já o silício solúvel representa as formas mais lábeis nos solos, consistindo principalmente de ácido silícico

monomérico. Esta fração do silício é geralmente extraída com soluções aquosas ou salinas diluídas, variando de acordo com a metodologia e extrator utilizados, entre 1 a 40 mg L⁻¹ (Hallmark et al., 1984). O conteúdo de silício total dos solos tem pouca correlação com a concentração de Si solúvel, que é bastante dinâmica.

A extração química de um nutriente do solo deve estimar a disponibilidade desse elemento para as plantas. O extrator remove parte da quantidade total, a qual está relacionada com a quantidade absorvida pelas plantas. O teste deve simular a parte do nutriente dos mesmos reservatórios do solo (solução, trocável, orgânica ou mineral) que são utilizados pelas plantas (Havlin et al., 2005). Assim, existe uma grande diversidade de métodos de extração de silício disponível para as plantas, sendo que nenhum extrator é igualmente eficiente em todos os tipos de solos, pois a quantidade extraída varia de acordo com a solução extratora utilizada (Berthelsen; Korndörfer, 2005; Snyder, 2001).

Os níveis críticos de Si no solo, em relação a algumas espécies de plantas, estão sendo atualmente estabelecidos no Brasil, usando-se como extratores de Si do solo o ácido acético e o cloreto de cálcio (Korndörfer et al., 1999, 2001), no entanto, ainda não está definido qual o melhor extrator a ser usado. O ácido acético superestima o teor de Si nos solos, principalmente nos corrigidos com calcário e naqueles que receberam a aplicação de fontes ricas em aluminossilicatos como as escórias de alto-forno (Pereira et al., 2004). O cloreto de cálcio apresenta baixo coeficiente de determinação, pois a menor concentração de Si na solução pode acarretar erros de leitura e determinação do Si (Korndörfer et al., 1999). Assim, em razão da crescente demanda pelo uso do Si, há necessidade de se investigar e identificar os extratores mais promissores e que apresentem alto potencial para determinação do Si disponível no solo.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e caracterização dos experimentos

O experimento foi realizado em vasos de 20 L, em casa de vegetação na área experimental do Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas / UNESP / FCA, no município de Botucatu, SP, incubando três solos com fósforo que, posteriormente, receberam materiais corretivos de acidez e foram cultivados com milho.

Foram selecionados três solos oxídicos que apresentaram variações texturais, todos ácidos, com baixos teores de P lábil, baixos teores de matéria orgânica e de silício. Foram coletadas amostras superficiais (0-20 cm) destinadas a análise química para determinação de P resina, Mehlich 1, P remanescente utilizando a técnica de Alvarez et al., (2000), teor de Si em três solos da Fazenda Experimental Lageado e São Manuel FCA, classificados, de acordo com EMBRAPA (2006): como NEOSSOLO QUARTZARÊNICO distrófico (RQ), LATOSSOLO Vermelho Distroférico (Lvd), textura argilosa e LATOSSOLO Vermelho Distrófico (LVd), textura média. (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas dos solos estudados.

Características	Solos		
	Lvd (textura média)	Lvd (argiloso)	RQ (arenoso)
pH (CaCl ₂)	4,0	4,1	4,3
M.O. (g dm ⁻³)	30	37	11
P _{resina} (mg dm ⁻³)	4	5	Trç
P _{mehlich -1} (mg dm ⁻³)	1,2	1,5	1
SiCaCl ₂ (mg dm ⁻³)	3,1	1,8	1,2
P _{rem} (mg dm ⁻³)	19	9	41
Al ³⁺ (mmol dm ⁻³)	19	15	4
H+Al (mmol dm ⁻³)	67	71	24
K (mmol dm ⁻³)	0,3	1,0	0,7
Ca (mmol dm ⁻³)	3	5	2
Mg (mmol dm ⁻³)	1	2	1
SB (mmol dm ⁻³)	4	9	4
CTC (mmol dm ⁻³)	71	79	28
V%	6	11	15
S (mg dm ⁻³)	11	26	7

Após estes procedimentos iniciais, cada solo foi submetido a três doses de P, (0, 50 e 150 mg dm⁻³), tendo como fonte superfosfato triplo em pó, umedecidos a 70% da capacidade máxima de retenção de água e mantidos incubados por 90 dias para que ocorresse a adsorção.

Após o período de incubação foram realizadas amostragens, para análise química de rotina e novas determinações dos teores de P através dos métodos resina, Mehlich 1 e P remanescente (P-rem).

Com base nesses resultados foi realizada a aplicação dos corretivos de acidez, calculando-se as doses visando elevar a 70% o valor de saturação por bases (Raij et al., 1996). Os corretivos de acidez utilizados foram: Calcário dolomítico, Escória de aciaria, Escória de aciaria de Forno de Panela e Wollastonita. Após a aplicação dos corretivos, os solos continuaram umedecidos a 70% da capacidade máxima de retenção de água para cada tipo de solo, permanecendo incubados por mais 60 dias. Este período de incubação foi utilizado para garantir que a reação do silicato com o solo seja completa, em razão do baixo PRNT apresentado por estes corretivos (Tabela 2), segundo análise realizada utilizando metodologia proposta por Alcarde, 2009.

O fósforo P-rem foi determinado após agitação de 5 cm³ de cada amostra de solo durante cinco minutos com uma solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ contendo 60 mg dm⁻³ de P

(H_2PO_4), e deixadas em repouso para decantação durante 16 horas (Alvarez V. et al. 2000). A diferença entre a quantidade de P adicionado e o quantificado na solução de equilíbrio após o período de agitação, representa o valor do P-rem.

Tabela 2. Análise dos materiais corretivos utilizados no experimento.

Características	Calcário Dolomítico	Escória Forno de Panela	Wollastonita	Escória de Aciaria
		g kg^{-1}		
Ca	277	274	262	216
Mg	164	15,6	13,1	15,6
Si	80,0	121	168,2	102,1
P_2O_5	trç	2,5	1,5	11,1
K_2O	0,5	0,3	0,1	0,3
		mg kg^{-1}		
B	200	300	100	900
Cu	50	20	10	30
Fe	3900	28600	600	193500
Mn	800	3700	50	21500
Zn	10	50	40	70
		(%)		
PN	84	77	60	70
RE	68	80	100	71
PRNT	58	62	60	50

Passado o período de reação dos corretivos novas determinações dos níveis de P foram realizadas e posteriormente aplicados os demais nutrientes, em quantidades idênticas para todos os tratamentos, fornecendo quantidades adequadas de potássio ($120 \text{ mg dm}^{-3}/\text{vaso}$), aplicado na forma de KCl, nitrogênio aplicado na forma de sulfato de amônio ($60 \text{ mg dm}^{-3}/\text{vaso}$) e 2 g vaso^{-1} dos micronutrientes como óxidos silicatados.

A cultura utilizada foi o milho, por ser altamente responsiva à adubação fosfatada. Foram semeadas 5 sementes por vaso e quinze dias após a emergência foi realizado o desbaste deixando-se duas plantas por vaso durante 60 dias, quando se realizou a colheita. Durante o crescimento da cultura, irrigações diárias e aplicações quinzenais de 20 mg dm^{-3} de N em solução foram realizadas, mantendo a umidade do solo próximo à capacidade de campo.

5.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os tratamentos dispostos em esquema fatorial 3x3x5, com quatro repetições constituídos por três solos, três doses de fósforo e quatro tipos de corretivos de acidez, além de um tratamento sem correção da acidez, totalizando 180 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de um vaso plástico contendo 20 dm³ de solo e duas plantas de milho (Figura 1).



Figura 1. Visão geral do experimento aos 30 DAS

5.3 Avaliações no solo

5.3.1 Determinações químicas nos solos

A amostragem do solo foi efetuada em cada vaso, ao final do período de incubação com fósforo e com os materiais corretivos da acidez. Nas amostras de solo foram realizadas as determinações de: pH em CaCl_2 , P, Ca, Mg e K extraídos pela resina trocadora de íons, $\text{H}+\text{Al}^{+3}$ por acetato de cálcio (Raij et al., 2001), Si com uma solução de cloreto de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (Korndörfer et al. 2004) e pelo extrator ácido acético a $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$ e P remanescente. Os teores de fósforo foram determinados também pelo extrator Mehlich 1, na relação solo: solução de 1:10, com tempo de agitação de 5 min.

5.3.2 P remanescente

O fósforo remanescente consiste no fósforo que resta na solução após agitação do solo por determinado período com uma solução contendo uma concentração inicial de fósforo. Realizou-se a determinação do fósforo remanescente, segundo metodologia preconizada por Alvarez et al. (2000). O P remanescente (P-rem) foi determinado na solução de equilíbrio após a agitação de uma amostra de solo de 5 cm^3 com 50 mL de solução de CaCl_2 10 mmol L^{-1} , contendo 60 mg L^{-1} de P, durante uma hora e após a amostra ser centrifugada e filtrada, procedeu-se a determinação do teor de P na solução.

5.4 Avaliações na planta

5.4.1 Produção de massa seca e acúmulo de fósforo

Aos 60 dias após a emergência do milho, por ocasião da colheita, estas plantas foram levadas para o laboratório, acondicionadas em sacos plásticos, para determinação da massa seca, de altura de plantas, diâmetro do colmo, determinação do índice de cor verde e acúmulo de fósforo.

O diâmetro do caule foi medido na altura de 1 cm do solo com o auxílio de um paquímetro digital; a altura foi medida com uma régua milimetrada.

As plantas de milho foram colhidas e separadas em raiz e parte aérea. Posteriormente foram lavadas em água de torneira e com detergente neutro e depois com água deionizada. O material vegetal foi seco em estufa com circulação de ar forçada acerca de 60 - 70 °C, até massa constante, para obtenção da massa de matéria seca da parte aérea e depois de pesada, a mesma foi triturada em moinho tipo Wiley e mineralizada por digestão sulfúrica (Tedesco et al., 1995) determinando a concentração de P, pelo método descrito por Malavolta et al., (1997) e Si pelo método proposto por Korndörfer et al. (2004).

Com os dados do teor de P, Si e a massa da matéria seca, foi calculado o acúmulo de P e Si na parte aérea das plantas.

5.4.2 Determinação do índice de cor verde

As leituras correspondentes ao teor de clorofila na folha para o milho foram avaliadas por meio do uso do medidor portátil de clorofila (modelo Minolta SPAD 502), denominado clorofilômetro, o qual possibilita (leituras SPAD), com valores em absorbância, em cada uma das repetições.

Estas determinações foram realizadas quinzenalmente utilizando-se duas plantas por parcela. As leituras com medidor de clorofila foram realizadas na penúltima e na última folha totalmente expandidas, sendo uma leitura de cada lado do limbo foliar, no terço médio da folha, sem considerar a nervura central e as margens (Argenta et al., 2001).

5.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com auxílio do programa SISVAR (Ferreira, 2003). Os efeitos das doses de P foram testados por meio de equações de regressão. Os modelos de regressão foram escolhidos com base no teste F, com significância de 1% e 5 % de probabilidade, e nos seus respectivos coeficientes de determinação. A eficiência dos extratores foi avaliada através da análise de correlação linear simples de Pearson, empregando-se a quantidade total de

fósforo absorvida pelo milho e os teores de fósforo e silício extraídos pelos diferentes métodos testados. Foram consideradas correlações com níveis de significância maiores que 80% ($\alpha < 0,01$).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análises químicas dos solos

Analisou-se a interação entre as doses de fósforo e os corretivos, nas seguintes variáveis do solo: pH em CaCl_2 , Al, CTC, V%, P remanescente, teor de P e teor de Si.

6.1.1 pH, V% e Al

Comparando os silicatos e calcário, verifica-se que a Wollastonita proporcionou maior eficiência na elevação do pH no solo arenoso e de textura média. O calcário e a escória forno de panela apresentaram comportamento semelhante, o que pode ser explicado por esses corretivos apresentarem reatividade e PRNT semelhantes. O mesmo não ocorreu com a escória de aciaria, que apresentou os menores valores de pH quando comparada aos demais corretivos, o que pode ser explicado por este material apresentar maior granulometria e consequentemente requer maior tempo para que ocorra reação.

Observa-se que os solos analisados responderam à aplicação dos corretivos o que influenciou nos valores de pH. No solo arenoso a wollastonita diferiu dos demais corretivos, o que demonstra maior capacidade de correção do pH por esse corretivo no solo arenoso. Entretanto, neste solo, os valores de pH são menores que aqueles dos demais solos utilizados, discordando de Deus (2010) que encontrou maiores valores de pH em solo arenoso, em

comparação a dois solos com maiores teores de argila e com aplicação de calcário e silicatos. Segundo Assis et al. (2007), este fato, pode estar relacionado ao baixo tamponamento do solo arenoso, em que o efeito do corretivo diminui quando o pH atinge valores elevados (Tabela 3). Mello, (2005) utilizando wollastonita como fonte de Si, também observou aumento do pH em quase duas unidades com a dose de silício de 450 mg dm^{-3} . Cardoso (2003) também observou incremento de pH com a adição de silicato de cálcio ao Neossolo Quartzarênico cultivado com pastagem degradada.

O máximo valor de pH encontrado no solo argiloso e no solo de textura média com a aplicação de wollastonita ocorreu, provavelmente porque os ânions SiO_3^{-2} resultantes da dissociação do CaSiO_3 , se combinam a prótons H^+ dissociados na solução do solo. Há evidências (JOLY, 1966; LINDSAY, 1979) de que a espécie H_2SiO_3 , produto final da combinação do SiO_3^{-2} com dois prótons H^+ , não se estabiliza como tal no solo. Ela tende a se combinar 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, discordando de Paim, et al. (2003) que observaram diminuição da atividade dos ânions SiO_3^{-2} como bases, devido à precipitação, quando houve crescimento brusco da dose de silício de 6.040 para $13.660 \text{ mg dm}^{-3}$.

Tabela 3: Valores de pH no solo em função da aplicação dos corretivos nos solos.

Solos	pH					
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. aciaria	CV (%)
RQ	4,1 c ⁽¹⁾	5,3 ab	5,5 a	5,4 ab	5,2 b	2,9
LVd	4,0 d	5,7 b	5,9 a	5,6 b	5,4 c	2,8
Lvd	4,0 c	5,7 a	5,8 a	5,7 a	5,5 b	2,0

Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%

Observando isoladamente os efeitos dos corretivos nota-se, na Tabela 3, que a wollastonita foi o corretivo que mais elevou o pH em todos os solos estudados. Segundo Korndörfer et al. (2002), quanto maior a dose de Si, maior o pH do solo e a wollastonita possui o maior teor de Si em sua composição, quando comparada aos demais corretivos. Faria (2000) observou aumento linear nos valores de pH, à medida que se aumentava o teor de Si disponível no solo. Observa-se que a aplicação dos corretivos, além de aumentar o pH e reduzir o teor de Al^{+3} , também aumentou a porcentagem de saturação por bases dos solos estudados (Tabela 4) concordando com Mello, (2005). No solo arenoso, a V% inicial era de 15 e após a aplicação dos

corretivos, esse valor subiu para valores próximos aos 70%. O mesmo ocorreu com os solos de textura média e argilosa onde a saturação de bases inicialmente era de 11% e 26% respectivamente, com a aplicação dos corretivos esse valor elevou para próximo de 80 %.

Analisando o efeito isolado da aplicação dos corretivos, observa-se que os valores de saturação por bases, aumentaram significativamente em comparação ao tratamento sem correção e que a wollastonita foi responsável pelo maior valor nesse solo, quase 80%, diferindo dos demais corretivos (Tabela 4). Mello, (2005) observou que doses de silício também favoreceram o aumento da porcentagem de saturação por bases do solo, corroborando resultados obtidos por Arantes (1997), em estudo sobre aplicação de silício para arroz de sequeiro, ao verificar aumento da porcentagem de saturação por bases do solo (17% para 40%) após aplicação da wollastonita.

Tabela 4. Valores de V%, em função da aplicação dos corretivos nos solos.

Solos	V%					
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. aciaria	CV (%)
RQ	32 b	66 a	69 a	68 a	68 a	6,2
LVd	13 c	71 b	79 a	75 ab	73 b	8,0
Lvd	20 b	75 a	76 a	77 a	75 a	11,7

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%.

Observa-se que todos os corretivos tiveram ação semelhante, não diferindo entre si em relação aos teores de Al no solo (Tabela 5). Com o aumento do pH após a aplicação dos corretivos, ocorreu a precipitação do Al^{+3} na forma de $Al(OH)^3$ (KINRAIDE, 1991). O efeito do aumento do pH na redução dos teores de Al^{+3} foi confirmado pelas relações negativas entre ambos em todas os solos estudados.

Tabela 5. Teores de alumínio em função da aplicação dos corretivos nos solos.

Solos	Alumínio ($mmol_c dm^{-3}$)					
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria	CV (%)
RQ	4,8 a ⁽¹⁾	0,2 b	0,1 b	0,1 b	0,2 b	44,2
LVd	9,5 a	0,5 b	0,1 b	0,1 b	0,1 b	22,0
Lvd	9,5 a	0,1 b	0,0 b	0,1 b	0,1 b	24,4

Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%

Trabalhando com 26 amostras de solos ácidos do Estado de Santa Catarina, Figueiredo e Almeida (1991) também observaram que os teores de Al foram reduzidos com a aplicação de calcário. A quantidade de Al complexado é dependente do pH (HARGROVE e THOMAS, 1984), e com a elevação do pH ocorre a formação de hidróxidos de alumínio (VANCE et al., 1996). Outra explicação atribuída para a redução do Al é o aumento da concentração de Ca oriundo dos corretivos, que pode deslocar o Al dos complexos orgânicos (MENDONÇA e ROWELL, 1994). Esses mesmos autores observaram redução do Al fraca e fortemente complexada pela M.O. na camada superficial do solo (0-8 cm), com a aplicação de calcário, o que foi explicado devido à remoção do Al pelo Ca oriundo do calcário; no entanto, esse Al foi precipitado, pois não se detectou aumento dos teores trocáveis. Faria (2000) observou diminuição no teor de alumínio no solo de 8 para 2 mmol_c dm⁻³ e aumento no pH em CaCl₂ de 4,2 para 4,8 em NEOSSOLO Quartzarênico e de alumínio de 2 para 0 mmol_c dm⁻³ e aumento no pH em CaCl₂ de 4,6 para 5,1 em LATOSSOLO Vermelho-Amarelo, com aplicação de doses de Si.

6.1.2 CTC

Foram verificados, em todos os solos estudados, efeitos significativos de doses de fósforo e fontes de corretivos sobre a CTC do solo, porém não houve interação desses fatores nos solos arenoso e argiloso. Observa-se que a CTC foi fortemente dependente do pH, ou seja, a CTC dos solos estudados aumentou com a aplicação dos corretivos quando compara-se com o tratamento sem correção (Tabelas 6 e 7). O aumento da CTC, considerando as doses de fósforo, seguiu comportamento linear e quadrático (Tabela 7). Análises de regressão apontaram tendência crescente nos valores desta variável de acordo com o aumento das doses de P.

Nos solos estudados, a matéria orgânica desempenhou importante papel na disponibilidade de nutrientes, pois a maior parte da CTC destes solos é devido aos colóides orgânicos, principalmente porque são solos com cargas variáveis ou dependentes de pH. Com a variação do pH do solo, ocorreu dissociação e protonação dos grupos funcionais presentes na superfície como o carboxil, fenólicos e aminas, provenientes da matéria orgânica e o hidroxil advindo dos óxidos de alumínio, de ferro e dos argilominerais, podendo ser tanto positivas como negativas, uma vez que, ao se elevar o pH esses grupos se desligaram do mineral liberando íons H⁺ e formando uma carga negativa no mineral.

Tabela 6. Valores de CTC no solo arenoso e argiloso, em função da aplicação dos corretivos.

Corretivos	CTC	
	Solo arenoso	Solo argiloso
Sem correção	42,35 B ⁽¹⁾	79,94 C
Calcário	54,21 A	98,17 B
Wollastonita	49,70 A	93,18 B
Esc. FP	49,41 A	87,75 BC
Esc. Aciaria	55,12 A	110,32 A
C.V (%)	10,19	C.V (%) 9,86

Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%

Observa-se que nos tratamentos nos quais não houve correção da acidez que a adição de fósforo ao solo, também aumentou os valores de CTC, o que pode ser atribuído à adsorção específica do fosfato pelos óxidos de ferro e de alumínio, bem como, pelos argilominerais.

Ao estudar a relação entre os parâmetros de adsorção de P e atributos físicos e químicos dos solos, Côrrea et al. (2011) observaram relação da CTC com a CMAP, pois a relação é direta e desse modo quanto maior o teor de argila maior a CTC, e quanto maior o teor de argila, normalmente, maior a CMAP. Em estudo, realizado durante seis anos por Dynia & Camargo (1998), num Latossolo do estado de Goiás, observou-se que tanto a adição de fosfatos quanto a combinação calagem e fósforo ocasionaram aumento na carga elétrica líquida e na CTC efetiva.

Tabela 7. Valores de CTC, em função da aplicação dos corretivos e doses de P no solo de textura média.

Doses	CTC				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo textura média					
0	72,2 c ⁽¹⁾	90,3 a	77,7 ab	78,4 abc	86,4 ab
50	70,4 c	91,2 b	76,1 bc	83,1 b	102,2 a
150	75,8 c	93,7 ab	85,7 bc	98,4 a	101,4 a
Ef. de doses	N.S	Q** ⁽²⁾	L*	L**	Q**
C.V (%) 7,3					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: P<0,05; ** P<0,01

6.1.3 Cálcio e Magnésio

A interação entre as doses de fósforo e os corretivos, não foi significativa para o teor de cálcio disponível, nos solos RQ (textura arenosa) e LVd (textura média), para os quais foi verificada significância para as doses de fósforo, as quais ajustaram-se ao modelo de regressão linear e quadrático. Analisando o efeito isolado dos fatores, nota-se na Tabela 8, que todos os corretivos, aumentaram o teor de Ca nos três solos estudados, não confirmando os dados de Faria et al. (2008) que analisando, os efeitos residuais da aplicação de silicato de cálcio nos atributos químicos do solo e da planta, observaram que os maiores teores de Ca^{+2} foram observados para o tratamento com calcário.

No solo RQ (textura arenosa), pode-se observar que as escórias proporcionaram maiores teores de Ca no solo, a wollastonita apresentou comportamento semelhante às escórias e ao calcário e neste mesmo solo, em relação à aplicação das doses de fósforo, nota-se que há aumento linear do teor de Ca, conforme se aumenta a concentração de P no solo, justamente pela fonte de fósforo utilizada ter sido o superfosfato triplo, que contém Ca em sua composição (Figura 2 a e b). Queiroz, 2006, observou que quanto maior a dose de Si, maior o teor de Ca trocável encontrado, mostrando que a fonte de Si é também uma fonte de Ca e provavelmente reativa. Ramos (2005) concluiu em seu estudo que a fonte de Si (Siligran) pode ser considerada como uma das melhores para o fornecimento de Ca, confirmando os dados obtidos neste estudo.

Tabela 8. Teor de Ca no solo, em função da aplicação dos corretivos no solo arenoso e de textura média.

Corretivos	Teor de Cálcio ($\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$)	
	Solo arenoso	Solo de textura média
Sem correção	8,40 C ⁽¹⁾	4,66 D
Calcário	20,24 B	31,35 C
Wollastonita	25,79 AB	56,86 A
Esc. FP	26,83 A	49,23 B
Esc. aciaria	28,11 A	53,82 AB
C.V (%)	9,86	15,20

Médias com letras maiúsculas diferentes na mesma coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%.

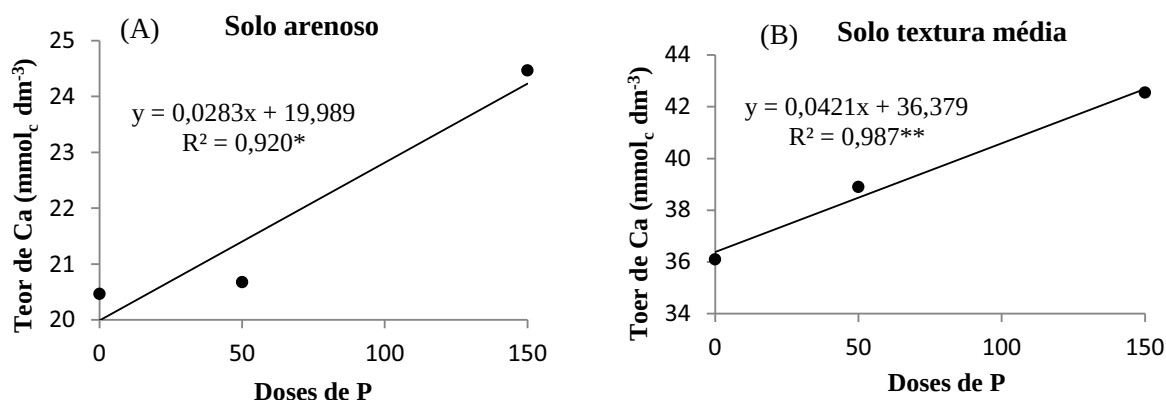


Figura 2. Efeito linear para teor de Ca disponível no solo RQ e LVd em função da aplicação de doses de P.

Os teores de Ca trocável no solo RQ foram menores do que os encontrados nos outros dois solos estudados, corroborando resultados de Queiroz, (2006). Faria (2000) obteve valores crescentes de Ca trocável no solo, sendo que os maiores valores foram observados no Neossolo Quartzarênico, que aumentou de 5,2 para 7,8 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Já no Latossolo Vermelho-amarelo, houve um incremento de 4,3 para 6,1 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com as doses de Si aplicadas. Essa diferença entre os solos pode ser explicada devido a maior quantidade de corretivos aplicada aos outros dois solos, em função da dose necessária para atingir V% de 70.

No solo de textura média, o maior teor de Ca, foi observado no tratamento que recebeu a aplicação de wollastonita, corretivo com maior porcentagem deste nutriente em sua composição, em relação aos demais e o mesmo comportamento que ocorreu no solo RQ, em relação às doses de fósforo, onde neste solo, também houve aumento linear do teor de Ca disponível no solo (Figura 2 a e b). A interação entre as doses de fósforo e os corretivos, foi significativa para o teor de cálcio disponível no solo Lvd, textura argilosa, apresentando comportamento linear e quadrático, devido ao incremento de Ca presente na composição do superfosfato triplo em conjunto com o Ca dos corretivos (Tabela 9).

A aplicação dos corretivos ao solo aumentou os teores de Mg confirmando resultados de Prado et al. (2003) e Rezende et al. (2007), como pode-se observar na Tabela 10. Houve interação significativa entre as doses de fósforo e os corretivos, para o teor de magnésio disponível nos solos estudados. Observa-se que o calcário proporcionou os maiores teores de Mg nos solos, o que pode ser explicado por este corretivo possuir maiores quantidades de Mg em sua composição.

Tabela 9. Teor de Ca no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P no solo argiloso

Doses	Teor de Cálcio (mmol _c dm ⁻³)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. aciaria
Solo argiloso					
0	3,5 c ⁽¹⁾	47,8 b	63,2 a	48,7 b	59,9 a
50	3,5 c	60,0 a	58,4 ab	54,8 b	57,2 ab
150	7,9 d	59,4 c	63,9 b	64,7 b	80,0 a
Ef. de doses	L** ⁽²⁾	Q**	Q**	L**	Q**
C.V (%) 4,25					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

Tabela 10. Teor de Mg no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.

Doses	Teor de Magnésio (mmol _c dm ⁻³)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso ¹					
0	2,22 c	12,92 a	4,07 bc	5,47 b	4,30 b
50	2,12 c	11,61 a	3,77 bc	4,75 ab	6,19 a
150	2,44 c	11,60 a	3,44 c	5,76 b	6,50 b
Ef. de doses	N.S	N.S	N.S	N.S	N.S
C.V (%) 17,36					
Solo de textura média ¹					
0	0,83 c	23,09 a	2,84 c	10,22 b	9,00 b
50	0,92 c	25,33 a	3,14 c	8,89 b	10,82 b
150	1,36 d	25,53 a	3,55 d	8,36 c	12,04 b
Ef. de doses	N.S	L*	N.S	L*	L**
C.V (%) 12,46					
Solo argiloso ²					
0	1,9 d	32,0 a	4,2 c	9,2 b	10,4 b
50	1,7 d	44,0 a	4,1 c	11,9 b	12,0 b
150	3,3 c	30,6 a	4,8 c	13,6 b	15,4 b
Ef. de doses	L* ⁽³⁾	Q**	N.S	L**	L**
C.V (%) 7,58					

1- Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%. 2- Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (3) - L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01.

6.1.4 Extração de P pelos métodos P resina e P mehlich 1

Estudando-se o efeito do fósforo isoladamente, verificou-se que as doses desse nutriente aumentaram o teor de fósforo disponível (extraído por resina) em todos os solos estudados. Analisando a Tabela 11, observa-se que houve interação significativa entre a aplicação dos corretivos e as doses de fósforo. Nota-se que o teor de fósforo disponível no Neossolo Quartzarênico, variou de 2,6 a 79,1 mg dm⁻³ com a aplicação de calcário. No solo de textura média, (LVd), essa variação foi de 2,8 a 76,3 mg dm⁻³ com aplicação de escória de aciaria e no solo de textura argilosa, (Lvd), o teor de fósforo disponível, variou de 4,8 mg dm⁻³ inicialmente para 82,8 mg dm⁻³ com aplicação de escória de aciaria. Carvalho (1999) trabalhando com um Latossolo Vermelho-escuro não observou significância para as doses de silicato de cálcio (CaSiO₃) na variação do teor de fósforo no solo.

Tabela 11. Teor de P no solo, extraído por resina, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.

Doses	P resina (mg dm ⁻³)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	2,6 a ⁽¹⁾	2,7 a	4,8 a	3,2 a	5,5 a
50	20,7 a	23,4 a	26,3 a	20,8 a	26,7 a
150	66,6 d	79,1 a	68,8 cd	76,0 ab	73,6 abc
Ef. de doses	L**	Q*	L**	Q**	L**
C.V (%) 13,19					
Solo de textura média					
0	2,8 b	3,3 b	3,5 b	4,2 b	15,0 a
50	19,0 d	26,5 b	20,4 cd	22,4 c	35,0 a
150	59,7 d	68,0 c	65,8 c	71,8 b	76,3 a
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	L**
C.V (%) 3,55					
Solo argiloso					
0	4,8 b	5,7 b	6,3 b	6,0 b	17,8 a
50	22,6 b	24,2 b	26,5 b	26,0 b	34,1 a
150	54,4 d	77,2 b	64,6 c	63,2 c	82,8 a
Ef. de doses	L** ⁽²⁾	Q**	L**	L**	Q**
C.V (%) 5,92					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: P<0,05; **: P<0,01

Nota-se que o calcário possibilitou maiores teores de fósforo na maior dose de P aplicada, quando comparado a wollastonita, no Neossolo Quartzarênico, porém nos Latossolos, a escória de aciaria aumentou os teores de fósforo no solo, o que pode ser explicado, por duas hipóteses, em que, além do aumento do pH, a interação com o ânion silicato, que ao ser adsorvido à fase sólida do solo, compete pelos mesmos sítios que o fósforo, impedindo ou dificultando a adsorção deste, ficando conseqüentemente, disponível em solução (OBIHARA E RUSSEL, 1972). Assim, a correção da acidez do solo com silicatos, além de elevar o pH, aumentou a disponibilidade do P, pelo efeito adicional de deslocar o P adsorvido para a solução (VOLKWEISS E RAIJ, 1976).

A utilização dos corretivos da acidez auxiliou na dessorção do P, pois, com a elevação do pH, ocorreu aumento da solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio, aumento da concentração de OH^- na solução do solo, reduzindo a adsorção do fosfato na fase sólida do solo (CASAGRANDE E CAMARGO, 1997).

O maior teor de P nos tratamentos que receberam silicatos pode ser explicado devido ao somatório de dois efeitos: o poder alcalinizante do Si e a competição Si x P pelos mesmos sítios de adsorção dos solos. O efeito da adição dos silicatos é destacado pela tendência da diminuição da adsorção, em que foi menor nas maiores doses de P, discordando de Carneiro et al. (2006) que observou a diminuição do teor de P em função da adição de silício, que poderia ter sido ocasionada pela tendência de polimerização das unidades monômeras de $\text{Si}(\text{OH})_4$ em excesso, com formação de sílica coloidal ou amorfa que, de acordo com Oliveira (1984), pode impedir a saída do P ou, ainda, ocasionar adsorção do fósforo no próprio polímero de sílica. Leite (1997) verificou em Latossolo Roxo Distrófico, argiloso, que altos teores relativos de P em solução, influenciado pelo P aplicado na etapa anterior à saturação com Si, ocorreram nas concentrações elevadas de P associados às concentrações baixas de Si aplicado. Vale ressaltar que o Si, na forma de silicato de Ca ou de Mg e em doses elevadas como no trabalho de Roy et al. (1971), foi aplicado ao solo antes da fertilização fosfatada, à semelhança da prática da calagem, portanto, no estudo de Roy et al. (1971) a maior disponibilidade de P pode ter ocorrido mais por influência do incremento do pH do que pela competição entre Si e P pelos mesmos sítios de adsorção. No presente estudo, a aplicação das doses de P foi feita antes dos corretivos justamente para que ocorresse a adsorção e posteriormente fosse observado a capacidade dos silicatos na dessorção do P previamente fixado pelo solo. Segundo Plucknett (1971), a aplicação de silicato

aumenta a solubilidade de fósforo no solo e diminui a fixação desse elemento contido nos adubos fosfatados. Obihara e Russel (1972) relataram que a presença de silicatos somente reduz a adsorção de fosfato em pH acima de 7, quando a adsorção de silicato é aumentada e a de fosfato diminuída.

O emprego do silicato de Ca (CaSiO_3) e, ou, do silicato de Mg (MgSiO_3) como corretivo de solo em substituição ao CaCO_3 pode ser recomendado pela possível competição do Si e P pelo mesmo sítio de adsorção, reduzindo a fixação e possibilitando maior disponibilidade do P no solo (Carvalho et al., 2000). Como o ânion silicato é quimicamente adsorvido, há, a princípio, uma competição entre o Si e o P pelos mesmos sítios de adsorção. Assim, com a aplicação de silicatos, além da correção da acidez, pode haver maior disponibilidade de P pelo efeito adicional de deslocar o P adsorvido para a solução (Völkweis & Raij, 1977). Esse efeito foi observado no experimento, discordando dos dados obtidos por Carvalho et al. (2000), que, em estudo de competição Si x P, verificaram incremento de apenas 15 % de P em solução devido ao efeito do Si aplicado antes da adubação fosfatada, portanto de pequena magnitude.

O extrator de Mehlich 1, por se tratar de um extrator ácido, possui a capacidade de extrair formas de fósforo do solo ligadas principalmente ao cálcio, que não estariam prontamente disponível às plantas. É possível observar que a capacidade de recuperação do fósforo aplicado ao solo foi diferente quando se comparam os dois extratores, pois, nota-se que a resina extraiu mais fósforo em relação ao extrator Mehlich 1 (Tabela 12). Este fato pode ser explicado, porque a resina age de forma semelhante às raízes da planta, ou seja, quantificando também o fósforo lábil. De modo geral, as quantidades de fósforo extraídas pelos dois métodos variaram em termos relativos, em função das doses de fósforo aplicadas. Embora se diferenciem quanto à capacidade de extração, o uso de diferentes métodos na análise de fósforo leva a resultados não comparáveis em seus valores absolutos devido à influência de condições particulares de cada técnica de determinação (RAIJ, 1978; SILVA & BRAGA, 1992).

Para o extrator Mehlich 1 no solo LVd, não houve interação significativa entre as doses de fósforo e os corretivos, porém analisando isoladamente o comportamento das doses de fósforo aplicadas neste solo, observa-se efeito linear, ou seja, houve aumento dos teores de P com as doses de superfostato triplo.

Observa-se na Tabela 12 que no solo Lvd (textura argilosa), obteve-se teores menores quando comparado ao Neossolo Quartzarênico, mostrando que a capacidade deste

extrator diminui nos solos argilosos devido ao consumo de íons hidrogênio pelos grupos funcionais não ocupados pelo fósforo nos colóides inorgânicos e readsorção de fósforo aos colóides durante a extração (CAJUSTE & KUSSOW, 1974).

Tabela 12. Teor de P no solo, extraído por Mehlich 1, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.

Doses	P mehlich (mg dm ⁻³)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	0,7	1,2	1,3	1,0	1,6
50	6,9 b ⁽¹⁾	10,1 a	9,4 a	9,3 a	11,5 a
150	16,5 e	31,3 b	19,5 c	34,9 a	17,5 cd
Ef. de doses	L**	L**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 9,58					
Solo de textura média					
0	0,9	1,6	0,9	1,2	2,2
50	5,1	5,3	5,1	6,1	6,6
150	14,9 b	19,2 ab	16,2 ab	17,5 ab	21,8 a
Ef. de doses	L**	L**	L**	L**	L**
C.V (%) 34,12					
Solo argiloso					
0	0,5	1,1	1,1	0,6	2,2
50	2,6	3,1	3,5	3,6	4,0
150	10,5 b	11,6 b	11,2 b	11,6 b	15,0 a
Ef. de doses	L**(2)	Q*	Q*	L**	Q**
C.V (%) 16,07					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: P<0,05; ** P<0,01

Ao avaliar a capacidade máxima de adsorção de P em quatro tipos de solo e a sua correlação com características químicas e físicas do solo, bem como os níveis críticos de P no solo e na planta e a eficiência dos extratores Mehlich-1 e Resina de troca aniônica na quantificação do P disponível para plantas de mamoneira, Brito Neto (2011) observou que o extrator Melich-1 foi mais eficiente na extração de P, em relação à resina trocadora de íons, independentemente da dose aplicada, o que discorda dos resultados encontrados neste trabalho. No entanto, o fato de um extrator recuperar mais ou menos P não significa que esse seja melhor ou pior, dependendo mais de como as quantidades extraídas relacionam-se com a absorção pelas plantas. Esse

comportamento pode ser explicado pelo fato de que na região nordeste, onde aquele trabalho foi realizado, ocorrem solos menos ácidos do que nas outras regiões do país, o que favorece a formação de compostos pouco solúveis de fosfato de cálcio (P-Ca) naqueles solos, os quais apresentavam elevado teor de Ca^{2+} e pH próximo a neutralidade.

Dessa forma, os teores de P recuperados pelo extrator Mehlich-1 poderiam estar superestimados, uma vez que esse extrator consegue deslocar P ligado a Ca e a óxidos de Fe e Al, formas indisponíveis às plantas. De acordo com Olsen e Khasawneh (1980), extratores ácidos dissolvem predominantemente o P ligado ao Ca e quantidades menores de P ligado a Fe e Al, em função das características de solubilidade dos fosfatos o que permite inferir serem os extratores ácidos menos indicados para solos de regiões tropicais úmidas com predominância de caulinita e de óxidos de ferro e de alumínio na fração argila como é o caso dos solos estudados.

Observa-se pelos dados que o uso do silício não interfere na escolha do extrator, pois tanto o Mehlich 1 e a resina apresentaram o mesmo comportamento quando houve a adição de silício ao solo em relação ao fósforo extraído.

6.1.5 Correlação P mehlich e P resina no solo

Embora a maioria dos métodos utilizados na extração do P dos solos, baseie-se em determinações que refletem principalmente o fator ‘Quantidade’, existem métodos satisfatórios para avaliar a disponibilidade de P em solos, pois esse fator é o mais importante a ser considerado na análise de P (RAIJ, 1978 e 1989). Segundo esse autor, existem para uso no Brasil dois métodos principais, distintos, o método de Mehlich 1 e o da resina trocadora de ânions.

O estudo de correlação entre os teores de fósforo extraído pela solução de Mehlich 1 e resina encontram-se, representados na Figura 3, através do qual observam-se valores significativos de coeficientes de correlação, tal como observado em outros trabalhos (MIOLA, 1995; KROTH, 1998; BORTOLON, 2005). Verifica-se pelos elevados coeficientes de correlação e pela semelhança nos valores obtidos, que os dois extratores foram semelhantes na avaliação do P disponível para os três solos estudados. Essa eficiência é confirmada pela elevada correlação obtida entre os extratores, que para os três solos foi de 0,855.

Verifica-se que, independentemente das doses de P, o método da Resina apresentou maior capacidade de extração do P aplicado que o método de Mehlich 1. As diferenças

observadas na capacidade de extração do P adicionado são devidas aos diferentes processos de ação desses métodos. O método Mehlich 1, que é um processo químico, atua preferencialmente sobre determinadas formas de P no solo, como P ligado a cálcio. O método da Resina, por sua vez, atua pelo sistema de troca iônica, extraindo de modo indiscriminado o P lábil. No presente estudo, foram utilizados solos álicos, ricos em óxidos de ferro e alumínio, adubados com uma fonte solúvel de P. Nesta situação é de se esperar que a reserva de P lábil esteja principalmente nas formas de fosfatos de Fe e Al, que são mais removidas pelo método da Resina, do que pelo Mehlich 1, que tem uma ação preferencial sobre fosfatos de cálcio.

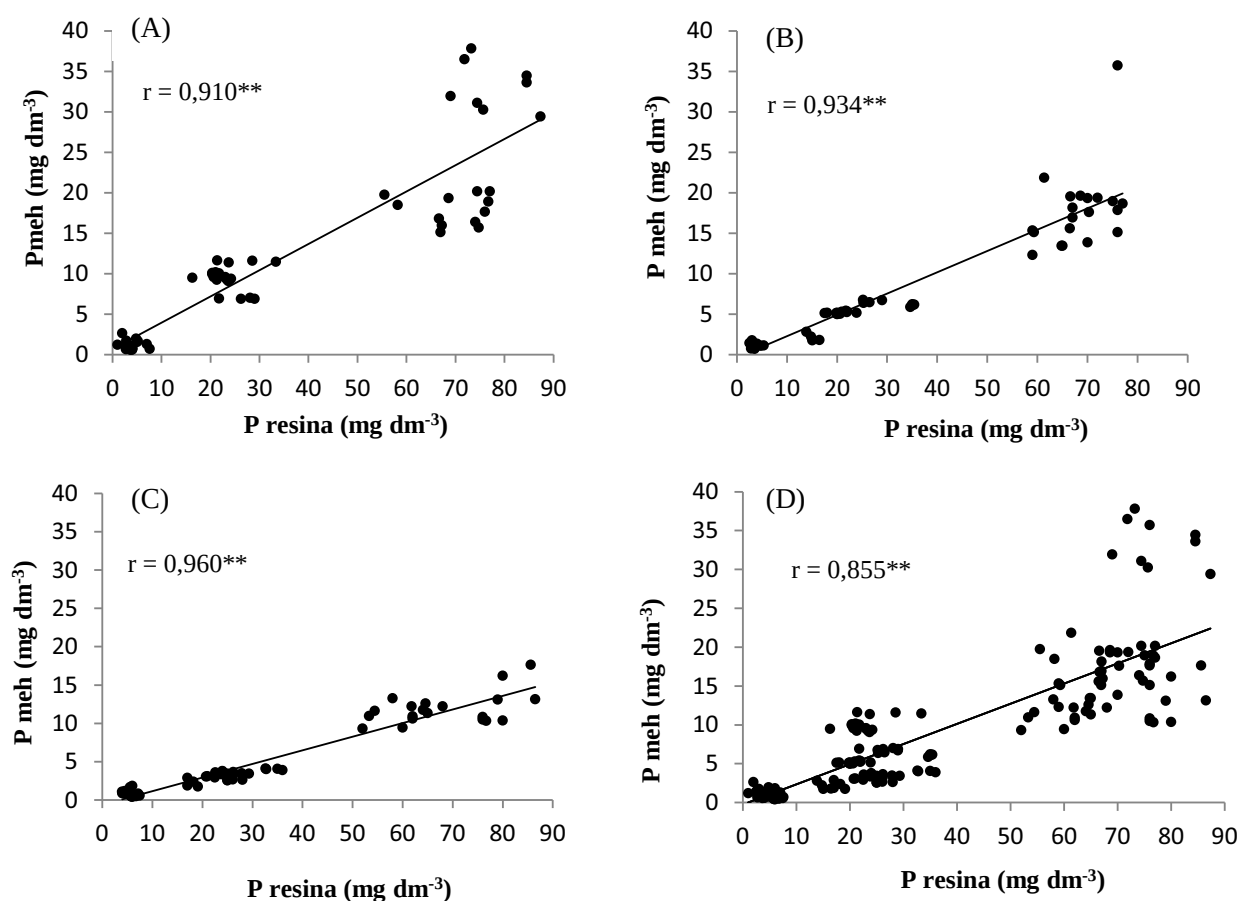


Figura 3: Correlação entre fósforo determinado pelos métodos resina de troca iônica e Mehlich-1; a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.

O método Mehlich-1 extrai o fósforo por dissolução seletiva das frações mais lábeis, a partir do abaixamento do pH e da presença de SO_4^{2-} . Em solos mais argilosos, com alto poder tampão, ocorre perda da capacidade de extração do método e o tempo de decantação de 16 horas utilizado na metodologia de extração (TEDESCO et al., 1995) pode promover a

readsorção de fósforo já dissolvido, resultando em valores de fósforo extraído menores nos solos argilosos em comparação aos solos arenosos (KAMPRATH & WATSON, 1980). Isso não ocorre com o método da resina que extrai o fósforo da solução do solo por mecanismo de troca iônica. Neste, o fósforo da solução passa para a resina por troca de íons, originários da própria resina, que vão para a solução a fim de manter o equilíbrio químico.

Embora os dois extratores tenham apresentado condições semelhantes, o método da resina, pela sua maior capacidade de extração, seria o mais indicado em estudos de calibração, uma vez que segundo Kochhann et al. (1982), métodos com essa característica apresentam menor possibilidade de ocorrência de erros analíticos, devido às maiores faixas de classes de P obtidas.

Em solos com maior poder tampão de fósforo, como os argilosos, a extração de fósforo é maior no método da resina do que no método Mehlich-1. Isso não necessariamente ocorre em solos arenosos. Quando os solos foram separados por classes texturais, a função da relação do fósforo extraído pelos métodos resina e Mehlich-1, que melhor se ajustou à distribuição dos pontos foi linear para os três solos estudados.

Schlindwein & Gianello (2008) observaram correlação significativa entre os extratores a 1%, porém com valores menores ao presente estudo, sendo encontrado o coeficiente de 0,53 para a relação Mehlich 1 e a Resina. Estes mesmos autores não observaram correlação linear, o que discorda dos resultados obtidos neste trabalho e dos apresentados por Miola (1995), Kroth (1998) e Bortolon (2005), pois à medida que aumenta o fósforo extraído pelos métodos diminui a relação do fósforo P resina:P Mehlich-1.

Corrêa e Haag (1993) ao compararem os extratores Mehlich 1 e Resina na avaliação do P disponível em Latossolo Vermelho Amarelo, álico cultivado com as gramíneas mostraram que os dois extratores foram eficientes e similares na avaliação do P disponível para as três gramíneas forrageiras, sendo que o método da Resina apresentou maior capacidade de extração do P aplicado, corroborando os resultados encontrados neste estudo.

6.1.6 P remanescente

Observa-se que não houve diferença significativa entre os corretivos nos solos de textura arenosa e média, nas doses 50 e 150 mg dm⁻³ de P, porém nestes dois solos, nota-

se diferença entre os corretivos onde não houve adição de P. Observa-se também que em todos os tratamentos com os corretivos houve comportamento quadrático das doses de fósforo. A magnitude de variação foi muito pequena para o solo arenoso. Em relação à disponibilidade de Prem, observaram-se comportamentos semelhantes da aplicação de corretivos, comparado ao solo não corrigido, concordando com Souza et al. (2008). No solo de textura argilosa, nota-se que houve maior variação quando se comparam a testemunha. Em todas as doses de P aplicadas houve diferença entre as fontes de corretivos, onde as escórias proporcionaram os maiores valores de P remanescente, variando de 16,5 mg dm⁻³ no tratamento sem correção a 23,8 mg dm⁻³ no tratamento com escória forno de panela, na dose de 150 mg dm⁻³ de P (Tabela 13).

Tabela 13. Teor de Prem no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.

Doses	Prem (mg dm ⁻³)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso ⁽¹⁾					
0	29,3 c	30,8 bc	33,8 bc	43,8 a	39,5 ab
50	32,9	36,0	37,0	38,3	35,0
150	37,8	41,8	41,0	44,3	40,8
Ef. de doses	L**	L*	L*	N.S	Q*
C.V (%) 12,79					
Solo de textura média ⁽¹⁾					
0	13,8 c	20,3 ab	22,5 ab	22,8 ab	23,7 a
50	19,5	23,3	22,3	22,8	24,8
150	22,8	24,8	26,3	30,5	24,3
Ef. de doses	L**	N.S	N.S	L*	N.S
C.V (%)					
Solo argiloso ⁽²⁾					
0	12,3 d	19,5 ab	14,3 cd	16,8 bc	20,3 a
50	12,0 c	14,3 bc	14,5 bc	16,8 b	21,3 a
150	16,5 c	17,8 bc	20,5 b	23,8 a	20,0 b
Ef. de doses	Q**(3)	Q**	Q*	Q**	Q*
C.V (%) 7,94					

(1) - Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%. (2) - Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (3) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: P<0,05; ** P<0,01

Como o ânion silicato é quimicamente adsorvido, há, a princípio, uma competição entre o Si e o P pelos mesmos sítios de adsorção. Assim, com a aplicação de silicatos,

além da correção da acidez, pode haver maior disponibilidade de P pelo efeito adicional de deslocar o P adsorvido para a solução (Völkweis & Raij, 1977).

A interação entre doses de fósforo e corretivos não foi significativa para o solo de textura média, entretanto, analisando isoladamente o efeito de cada fator, nota-se que os corretivos tiveram comportamento semelhante, diferindo do tratamento sem correção da acidez, mostrando que somente com a correção da acidez é possível diminuir a adsorção de fosfato no solo. Apesar de não haver diferença significativa entre os corretivos é possível observar que a escória forno de panela proporcionou maior valor de Prem, o que pode ter sido influenciado pelo Si presente em sua composição. Os dados da Tabela 13 indicam pequena influência das doses de P, e dos corretivos sobre os valores de Prem, sugerindo que o fator textura suplantou os efeitos dos tratamentos aplicados aos solos.

6.1.7 Extração Si ácido acético e Si CaCl_2

Comparando-se os extratores, nota-se que o ácido acético extraiu maior quantidade de Si do solo em todas as fontes estudadas. Provavelmente, esse processo ocorreu porque este extrator é capaz de extrair formas de Si não disponíveis para as plantas, tais como formas polimerizadas ou mesmo Si presente na fase sólida do solo (argilominerais) superestimando os valores de silício em solução (QUEIROZ, 2003; BRAGA, 2004; VIDAL, 2005).

Os teores de silício extraídos em ácido acético $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$, foram influenciados pelas doses de fósforo e corretivos em todos os solos (Tabela 14 e 15). Os teores de silício em ácido acético foram maiores em relação aos teores obtidos com CaCl_2 . Isto pode ser devido, ao pH do ácido acético ser muito baixo (1,0 a 2,0), para a formação do complexo silico-molibdico (KORNDÖRFER et al., 1999).

Para os dois extratores utilizados, os teores de silício solúvel foram maiores no solo argiloso, seguido pelo de textura média e arenoso. Isso concorda com os resultados obtidos por Freitas et al. (1977) que mostraram teores de silício solúvel em água decrescendo na sequência solos podzolizados, NVef, LV fase arenosa e regossolo. A maior concentração de silício em solos argilosos pode ser devido à fração de silício extraído com ácido acético ser proveniente da fração argila.

A extração de Si pelo ácido acético (Tabela 15) revelou valores superiores em relação ao extrator cloreto de cálcio para todos os corretivos, exceto para o calcário que teve comportamento semelhante ao tratamento sem correção, concordando com resultados obtidos por Pereira et al. (2004) e Braga (2004) que, trabalhando com doses crescentes de sílica gel nas culturas de arroz e sorgo, também observaram incremento nos teores de Si no solo extraído com ácido acético em comparação ao cloreto de cálcio. Entretanto é importante ressaltar que o extrator ácido acético pode elevar os teores de Si extraído nos tratamentos que receberam aplicação de silicato e calcário (CAMARGO et al., 2007), além da interação com as doses de P que favoreceram a maior disponibilidade de P às plantas, devido ao deslocamento do P pelo Si nos sítios de adsorção do macronutriente (CHAVES; FARIAS, 2008; PULZ et al., 2008).

Tabela 14. Teor de Si em ácido acético no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.

Doses	Si ácido acético (mg dm ⁻³)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso ⁽¹⁾					
0	1,4 b	1,9 b	2,4 b	5,6 a	6,2 a
50	1,9 c	2,2 c	2,6 c	7,9 b	12,0 a
150	1,2 c	1,5 c	2,4 b	5,1 a	5,3 a
Ef. de doses	Q*	N.S	N.S	Q**	Q**
C.V (%) 14,79					
Solo de textura média ⁽²⁾					
0	2,2 b	2,9 b	4,6 b	18,9 a	18,9 a
50	2,4 b	2,9 b	4,9 b	20,6 a	20,6 a
150	1,6 c	2,1 c	4,6 c	17,8 b	19,5 a
Ef. de doses	N.S	N.S	N.S	Q*	N.S
C.V (%) 27,27					
Solo argiloso ⁽¹⁾					
0	2,8 b	5,1 b	5,3 b	23,4 a	20,4 a
50	3,4 d	4,9 cd	7,9 c	28,3 a	21,5 b
150	2,3 c	3,8 c	5,7 c	17,3 b	23,1 a
Ef. de doses	N.S	N.S	Q ⁽³⁾	Q**	N.S
C.V (%) 16,80					

1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1 %. 2) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5 %. (3) - L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo. *: P<0,05; ** P<0,01

Comparando-se os tratamentos, observa-se que os teores de silício extraídos do solo, foram superiores para os tratamentos que receberam escórias, em todos os solos estudados, evidenciando também efeito quadrático para a escória forno de panela, em relação às doses de fósforo aplicadas o que sugere a interação de Si e P no solo. Os teores de Si no solo, determinados usando-se os extratores CaCl_2 ou ácido acético, aumentaram em função da aplicação da escória. Resultados semelhantes foram observados por Melo et al. (2003) e Camargo et al. (2007). Os menores teores de Si encontrados nos tratamentos que não receberam adubação silicatada, para ambos os extratores utilizados, são consequência do seu avançado grau de intemperismo e lixiviação, assim como dos elevados teores de óxidos de Fe e Al, que são os principais responsáveis pela adsorção do Si da solução do solo (Tokura et al. 2007).

Para todas as doses de P adicionadas, os valores de Si solúvel obtidos pelos extratores cloreto de cálcio e ácido acético foram superiores, quando houve aplicação das escórias (Tabela 15). Estes resultados concordam com os obtidos por Lopes (1977), Oliveira (1984), Leite (1997) e Carvalho (1999), os quais evidenciaram que, nos tratamentos com aplicação de P, foram obtidos maiores teores de Si solúvel, quando comparados aos tratamentos sem sua aplicação. Este fato pode ser explicado pelo princípio de sorção recíproca, segundo o qual quanto maior a concentração de P, menor a quantidade de Si capaz de ser retida pela fase sólida do solo, visto que o P ocupa os mesmos sítios de adsorção que o Si e tem maior afinidade com o colóide, podendo deslocar, facilmente, o Si adsorvido (CAMARGO et al., 2005, CARNEIRO et al., 2006).

O acréscimo de P, na maior dose de P aplicada, no entanto, proporcionou menor extração de silício em ácido acético quando comparado ao CaCl_2 , corroborando o que foi observado por Camargo et al., (2005). Esses resultados, entretanto, são contraditórios aos diversos trabalhos que mostram que a aplicação de P pode proporcionar aumento no silício solúvel (LOPES, 1977, OLIVEIRA, 1984; CARVALHO et al., 2000; LEITE 1997).

De acordo com dados obtidos por Vidal (2005), nos solos onde houve adição de P, o Si remanescente foi maior estatisticamente, se comparado àqueles sem adição de P. O aumento do Si na solução, provocado pela adição de P ao solo, pode ser explicado pela maior preferência do P pelos sítios de adsorção dos sesquióxidos de ferro e alumínio, reduzindo a adsorção de Si. A adsorção de fósforo pelos sesquióxidos de ferro e alumínio pode diminuir de acordo com o pH.

Os teores de Si no solo, determinados usando-se o extrator cloreto de cálcio a $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ aumentaram, em função da aplicação dos silicatos. Observa-se que houve interação entre as doses de fósforo e os corretivos aplicados aos solos para os dois extratores. Barbosa et al. (2003) verificaram que o teor de silício disponível no solo foi incrementado de 1 para 14 mg kg^{-1} após aplicação de silicato de cálcio e magnésio de 1000 kg ha^{-1} . Cessa et al. (2004) aplicaram metassilicato de sódio (reagente analítico), fornecendo doses de Si que variaram de 0 a 400 mg dm^{-3} , na presença ($P = 560 \text{ mg dm}^{-3}$) e na ausência de fósforo. O silício solúvel do solo variou de 32,54 a $54,98 \text{ mg dm}^{-3}$ na presença do fósforo e de 15,62 a $35,42 \text{ mg dm}^{-3}$ na ausência de fósforo. Os mesmos autores não observaram a influência do silício nos teores de fósforo no solo, e verificaram que as doses de silício aumentaram o valor do pH em CaCl_2 do solo, sendo esse aumento mais significativo na presença do fósforo.

Tabela 15. Teor de Si CaCl_2 no solo, em função da aplicação dos corretivos e doses de P nos solos.

Doses	Si CaCl_2 (mg dm^{-3})				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	1,3 c ⁽¹⁾	1,3 c	1,3 c	2,5 a	1,9 b
50	1,6 c	1,7 bc	1,7 bc	2,6 a	2,1 b
150	1,6 b	1,9 b	1,8 b	2,5 a	2,3 a
Ef. de doses	L**	L**	Q*	N.S	N.S
C.V (%) 10,30					
Solo textura média					
0	1,5 c	1,8 c	1,5 c	4,9 b	3,7 a
50	1,8 b	1,8 b	2,2 b	3,8 a	3,7 a
150	1,9 c	2,0 c	2,3 c	3,9 a	3,3 b
Ef. de doses	Q*	L*	N.S	Q**	N.S
C.V (%) 11,40					
Solo argiloso					
0	2,2 c	2,3 c	2,5 c	6,2 a	5,1 b
50	2,2 e	2,6 d	4,2 c	6,3 a	5,2 b
150	2,5 d	2,9 c	5,0 b	6,1 a	4,9 b
Ef. de doses	N.S	Q**(2)	Q**	N.S	N.S
C.V (%) 4,54					

(1) - Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) - L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S – não significativo.*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$

6.1.8 Correlação Si ácido acético e Si CaCl₂

No solo, o teor de Si aumentou de forma linear, independentemente do extrator utilizado (Figura 4). Demonstrando que os dois extratores foram eficientes na extração de Si, na discriminação das quantidades crescentes aplicadas. Conforme Pereira et al. (2004), embora este fato não sirva de parâmetro para se definir o melhor extrator de Si no solo traz informações sobre exatidão.

O ácido acético extraiu os maiores teores de Si (entre 5 e 40 mg dm⁻³), enquanto o CaCl₂ foi o que apresentou a menor extração (teores entre 1,2 e 6 mg dm⁻³). Essa amplitude influencia a exatidão da análise, pois a faixa estreita de extração do CaCl₂ pode promover erros de análises.

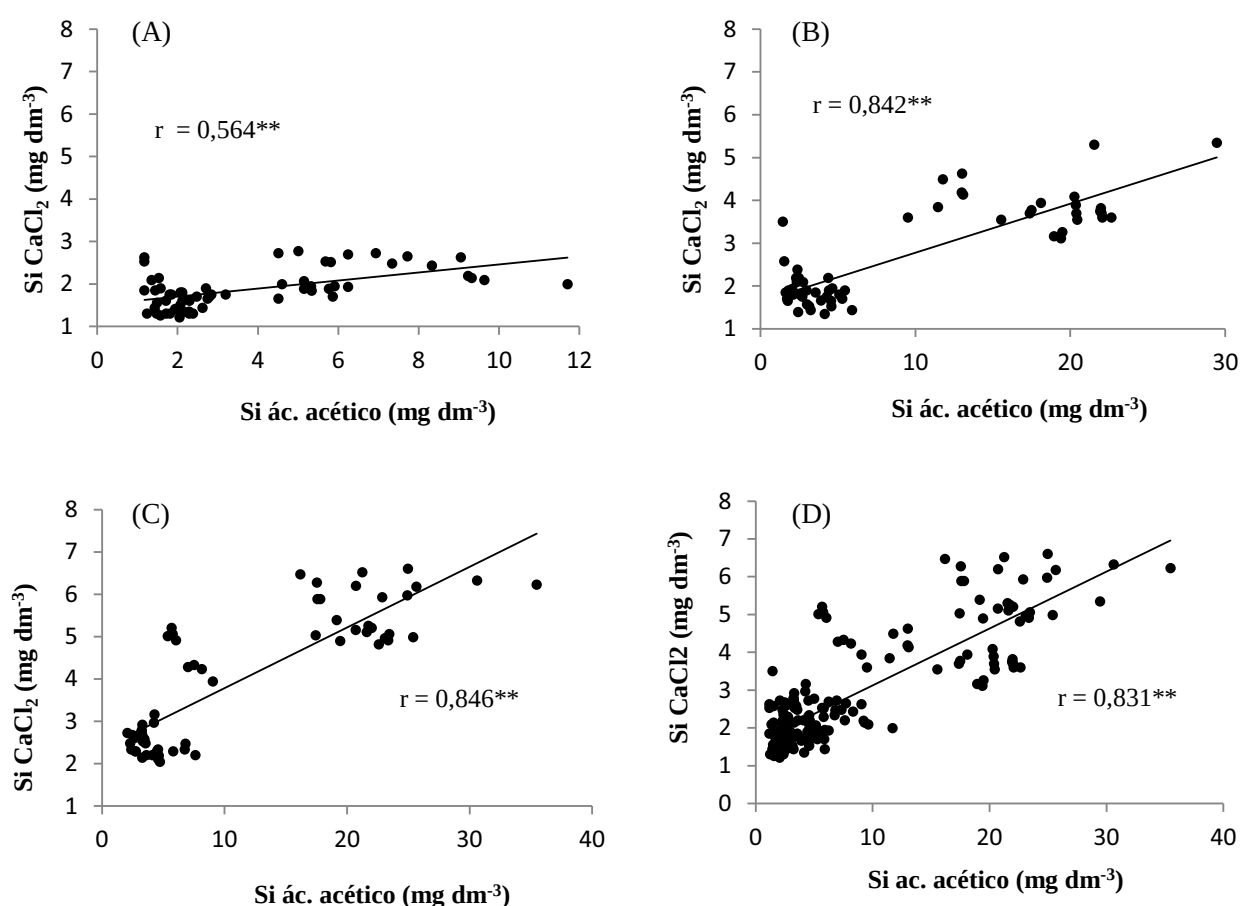


Figura 4: Correlação entre silício determinado pelos métodos ácido acético e CaCl₂ a) solo arenoso; b) solo de textura média e c) solo argiloso, d) todos os solos.

Em um estudo de comparação de métodos de extração de Si, em diferentes classes de solo da Austrália, Berthelsen (2000), também encontrou diferentes escalas de magnitudes entre os extratores. Os extratores tendem a atacar o Si em diferentes componentes da matriz do solo; soluções diluídas salinas, como o CaCl_2 , mensuram a quantidade de Si disponível na solução do solo, enquanto resultados obtidos com o uso de NH_4OAc (pH 4) e ácido acético indicam que o Si solubilizado origina-se de polímeros simples.

Observam-se maiores valores de coeficiente de correlação para o solo de textura argilosa, seguido de solo de textura média, quando comparado ao solo de textura arenosa. Esses resultados concordam com vários trabalhos sobre relação linear entre o teor de argila e silício extraível (Raij e Camargo, 1973; Freitas et al., 1977; Meyer e Keeping, 2001). As diferenças entre os teores de Si extraídos nos diversos tipos de solos não estão baseadas apenas no teor de argila, mas também no teor de óxidos de ferro e de alumínio e na sua reserva de silício, que eram muito inferiores no solo Neossolo Quartzarênico quando comparado aos Latossolos utilizados neste estudo.

Revisando vários trabalhos com extratores de Si no solo, Berthelsen & Korndörfer (2005), verificaram que muitos extratores apresentam excelentes curvas de resposta com o Si obtido pelas plantas, porém, após adições de silicatos nesses solos, alguns extratores passaram a superestimar a disponibilidade de Si para as plantas.

O extrator deve possuir a propriedade de poder simular o potencial elétrico da solução do solo, apesar de que o silício solúvel em pH abaixo de 8,0 estar predominantemente, na forma de ácido monossilícico, sem carga (BERTHELSEN & KORNDÖRFER, 2005). Vários trabalhos mostram boa correlação entre os teores de silício nas folhas, com o silício extraído com cloreto de cálcio ou ácido acético, porém este último superestimando os teores de silício assimilável (BERTHELSEN et al., 2003; CAMARGO et al., 2007; PEREIRA et al., 2007; RAMOS et al., 2008).

Trabalhos de pesquisa mostram que o cloreto de cálcio extrai quantidades menores de silício do solo, porém discernindo e medindo melhor o silício disponível presente na solução do solo. Por outro lado, o ácido acético extrai silício originário, também, de polímeros simples, os quais são afetados por mudanças no pH, CTC e a relação Si:Al solúveis na solução do solo (BERTHELSEN, 2000, citado por BERTHELSEN; KORNDÖRFER, 2005; PEREIRA et al., 2007).

Ao avaliar extratores para Si no solo Inocêncio et al. (2010) concluíram que os métodos CaCl_2 e ácido acético são recomendados para extração de Si de acordo com os solos estudados. Em condições com elevados teores de Si e em solos argilosos o CaCl_2 apresenta melhor correlação.

Avaliando os teores de Si em solos muito intemperizados do Cerrado com diferentes mineralogias, Camargo et al. (2007) obteve que o ácido acético extraiu mais Si em relação à água e CaCl_2 . Os mesmo autores encontraram maiores teores de Si nos solos com maior quantidade de argilas de baixa atividade química e maior no horizonte B do que no A.

6.2 Avaliação de atributos nas plantas de milho

Para todos os parâmetros analisados na planta observa-se que houve interação significativa entre as doses de P e os corretivos aplicados nos três solos estudados.

6.2.1 Teor e acúmulo de P na planta

Os teores e acúmulo de P na matéria seca das plantas aumentaram significativamente. As regressões polinomiais mostraram que, para todas as fontes de corretivos, os teores e o acúmulo do elemento na planta responderam aos aumentos nas doses segundo equações quadráticas e lineares (Tabelas 16 e 17). Dentre os solos, as respostas foram consideravelmente maiores no solo de textura argilosa.

Observa-se no solo arenoso que os teores de P nas plantas de milho foram menores quando comparados aos demais solos estudados, com diminuição na concentração do nutriente na planta na maior dose de P. Isso provavelmente aconteceu devido ao efeito diluição do elemento na planta, já que este solo proporcionou maior crescimento das plantas. Observa-se entre os corretivos que as escórias de aciaria proporcionaram maior teor de P na planta quando não houve adição deste nutriente, ou seja, na dose zero, entretanto nas demais doses quando utilizou-se calcário os teores de P na planta foram maiores. Esses valores estão bem acima dos 1,00 e 1,20 g kg^{-1} observados por CAMARGO, (1994) em plantas de milho, que avaliou o uso da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo e seu efeito sobre a disponibilidade de fósforo e a simbiose micorrízica aplicados a um Latossolo Vermelho Distrófico.

Tabela 16. Teor de P nas plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Teor de fósforo				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	0,53 c ⁽¹⁾	1,32 b	1,23 b	1,46 a	1,53 a
50	1,43 d	2,27 a	2,13 b	1,95 c	2,17 ab
150	1,34 c	1,77 a	1,62 b	1,61 b	1,62 b
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 4,10					
Solo de textura média					
0	0,40 e	0,62 d	0,90 c	1,10 b	2,00 a
50	1,10 c	2,02 b	2,36 a	2,04 b	2,08 b
150	1,24 d	1,47 c	1,90 b	2,03 b	2,45 a
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	L**
C.V (%) 4,24					
Solo argiloso					
0	0,70 e	1,01 d	1,30 c	1,48 b	2,02 a
50	1,14 d	2,06 c	2,15 bc	2,25 ab	2,29 a
150	2,14 e	2,54 c	2,31 d	2,80 b	2,94 a
Ef. de doses	Q**(2)	Q**	Q**	Q**	L**
C.V (%) 3,20					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

No solo de textura média, observam-se que os valores de teores e acúmulo de P foram muito menores em comparação ao solo arenoso, exceto, quando utilizou-se escória de aciaria na menor e na maior dose de P, demonstrando possivelmente interação de Si x P com uso deste corretivo, já que o fornecimento de P pela escória de aciaria foi significativo, pois neste solo a escória forneceu 435,5 mg de P vaso⁻¹ ou 21 mg dm⁻³ de P, o que se reflete também no acúmulo de P pela planta, que em todas as doses de fósforo utilizadas a escória de aciaria proporcionou valores maiores (Tabela 17).

No solo de textura argilosa, observam-se maiores valores de teor e acúmulo de P pelas plantas de milho. Nota-se que na maior dose de P com uso de escória de aciaria, o teor de P na planta foi de 2,94 g kg⁻¹, considerado adequado, pois o teor de P adequado

para a cultura encontra-se dentro de uma faixa de 2,0 a 4 g kg⁻¹ (Raij et al., 1997). Mais uma vez a escória de aciaria foi superior aos demais corretivos, tanto para o teor, quanto para o acúmulo que neste solo foi superior para todas as doses de P, sendo o valor máximo acumulado de 255,42 g vaso⁻¹. Pode-se inferir, contudo, que o aumento do teor e acúmulo de P pelas plantas tem sido pelo fornecimento de P pela escória, pois a contribuição desse nutriente por esse corretivo foi de 446,98 mg de P vaso⁻¹ ou 22,35 mg dm⁻³, o que poderia justificar o incremento de fósforo. Sugere-se então a possível interação entre Si x P no solo, mais até que o aumento do pH.

Ao avaliar as alterações químicas decorrentes da aplicação de termofosfatos em solo típico da região dos cerrados e a eficiência agrônômica desses fertilizantes Büll et al. (1997), observaram que as plantas tratadas com termofosfato magnesiano em pó apresentaram a maior concentração foliar de fósforo, estatisticamente superior à das demais fontes, o que pode ser atribuído ao Si contido neste fertilizante fosfatado. As variações na concentração foliar de fósforo mostraram evolução no aproveitamento desse nutriente resultante do termofosfato granular. Os dados referentes ao acúmulo de fósforo na parte aérea confirmam essa tendência, e estão de acordo com a redução nos níveis de fósforo no solo com os cultivos sucessivos.

Ao avaliar os efeitos de dois corretivos de acidez do solo (silicato de Ca e Mg ou calcário dolomítico) e de doses crescentes de fósforo, sobre o crescimento e as eficiências nutricionais em *Stylosanthes guianensis* cv. Mineirão, Lopes et al. (2010), observaram que a maior eficiência de utilização de P observou que a maior eficiência de utilização de fósforo foi na presença de silicato, foi 23,7% superior que na presença de calcário, com metade da dose de P aplicada.

Observa-se que, semelhantemente ao que ocorreu com o teor de fósforo, o acúmulo foi maior quando foi utilizada a escória de aciaria em todos os solos estudados, inclusive onde não houve adição de fósforo; salienta-se, que a quantidade de fósforo fornecida por este corretivo influenciou nos tratamentos, já que a quantidade fornecida pela escória seria de 0,74 mg dm⁻³, 2,18 mg dm⁻³ e 2,24 mg dm⁻³ de P, para o solo arenoso, solo de textura média e solo argiloso respectivamente.

Tabela 17. Acúmulo de P nas plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Acúmulo de fósforo (mg vaso ⁻¹)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	0,28 b ⁽¹⁾	3,26 b	2,98 b	5,62 b	16,46 a
50	41,98 c	150,14 b	170,58 a	157,20 b	126,88 a
150	108,10 c	233,88 a	199,30 b	203,56 b	205,54 b
Ef. de doses	Q*	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,76					
Solo de textura média					
0	0,22 b	0,32 b	0,64 b	0,76 b	8,92 a
50	11,75 c	30,82 b	28,72 b	37,62 a	37,98 a
150	52,06 e	95,52 d	138,84 c	151,22 b	199,36 a
Ef. de doses	Q**	L**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 5,97					
Solo argiloso					
0	0,42 b	2,42 b	3,66 b	4,56 b	23,98 a
50	23,42 d	66,64 c	72,44 bc	77,32 ab	81,58 a
150	91,98 d	158,16 c	162,28 c	248,54 b	255,42 a
Ef. de doses	Q**(2)	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 4,03					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

No solo arenoso, mais uma vez o calcário, em conjunto com a maior dose de fósforo, possibilitou maior acúmulo de fósforo na parte aérea do milho. A wollastonita foi semelhante a escória de na dose 50, entretanto, somente neste caso, pois nos demais tratamentos, a escória de aciaria foi superior em todas as doses de P utilizadas. Uma provável justificativa para o ocorrido está no bloqueio de sítios de adsorção de P pelos ânions silicatos provenientes da dissolução da escória silicatada, disponibilizando, assim, mais P para as plantas.

Observa-se que no solo de textura média os valores médios de acúmulo de P na parte aérea do milho foram inferiores aos demais solos estudados para todas as doses de P utilizadas. Nota-se que na dose de 50 mg dm⁻³ de P onde não houve correção da acidez, o acúmulo de P foi muito baixo em relação aos demais solos estudados, o que provavelmente pode ser explicado pela alta fixação de P neste solo, já que o mesmo era altamente intemperizado. Observa-

se também que neste solo quando utilizou-se calcário, comportamento das doses de P ajustou-se ao modelo linear, diferindo-se das demais fontes.

No solo argiloso os valores médios de acúmulo de P pela matéria seca da parte aérea do milho foram maiores em relação aos demais solos estudados, notando-se que o valor máximo de acúmulo foi observado no tratamento em que foi adicionada a maior dose de P em conjunto com a escória de aciaria. Nota-se também que a escória de aciaria, tanto neste solo, como no solo de textura média proporcionou os maiores valores de acúmulo de P para todas as doses de P utilizadas, esse comportamento deve-se, provavelmente ao efeito favorável da competição entre o silicato contido na escória e o fosfato pelos mesmos sítios de adsorção no solo.

Ao avaliar a absorção de Si, de P e de alguns atributos de crescimento do milho, cultivado em solo fertilizado com fosfato, na presença e ausência de escória de siderurgia, Gutierrez (2007), observou que o acúmulo de P na massa seca da parte aérea do milho foi apenas influenciado pelo P aplicado ao solo não sendo observado o efeito da interação Si x P. Guss et al. (1990), também observaram boa capacidade de absorção de P em *Stylosanthes guianensis* em resposta a doses crescentes desse nutriente.

Os principais fatores que afetam a absorção de P pelas plantas são a taxa de crescimento radicular, a concentração do P na solução do solo e raio médio das raízes (Rosolem et al., 1994). Dessa forma, conclui-se que o maior acúmulo de P na presença do silicato resulta de maior disponibilização desse nutriente no solo, o que possibilitou maior desenvolvimento do sistema radicular, aumentando a capacidade exploratória das raízes e a capacidade de aquisição de nutrientes.

Ao avaliar se o efeito favorável do termofosfato magnesiano sobre a absorção de fósforo e produção de matéria seca por plantas de arroz deve-se à menor fixação do fósforo causada pela elevação do pH ou a um efeito favorável entre o silicato contido no termofosfato e o fosfato pelos mesmos sítios de adsorção no solo ou a ambos esses efeitos Baldeón, (1995) observou que o termofosfato magnesiano foi superior ao superfosfato triplo, com ou sem corretivo, quanto à produção de matéria seca e a quantidade de fósforo acumulado na planta quando aplicado em dose baixa em um Nitossolo de textura argilosa. O autor justificou esse comportamento devido provavelmente ao efeito combinado da sua ação alcalinizante com o da competição entre o silicato que contém e o fosfato.

6.2.2 Correlação P extraído do solo e acúmulo de P na planta

Para avaliar a eficiência dos métodos, foram feitos estudos de correlação entre o P extraído através de cada extrator e o P extraído pela planta. Na Figura 5, são apresentados os coeficientes de correlação linear, obtidos entre o P extraído por resina com o P acumulado na parte aérea das plantas de milho. O P acumulado pelas plantas de milho relacionou-se significativamente com as frações de P extraídas pela resina trocadora de íons, concordando com Gonçalves e Meurer (2009), que obtiveram resultados semelhantes.

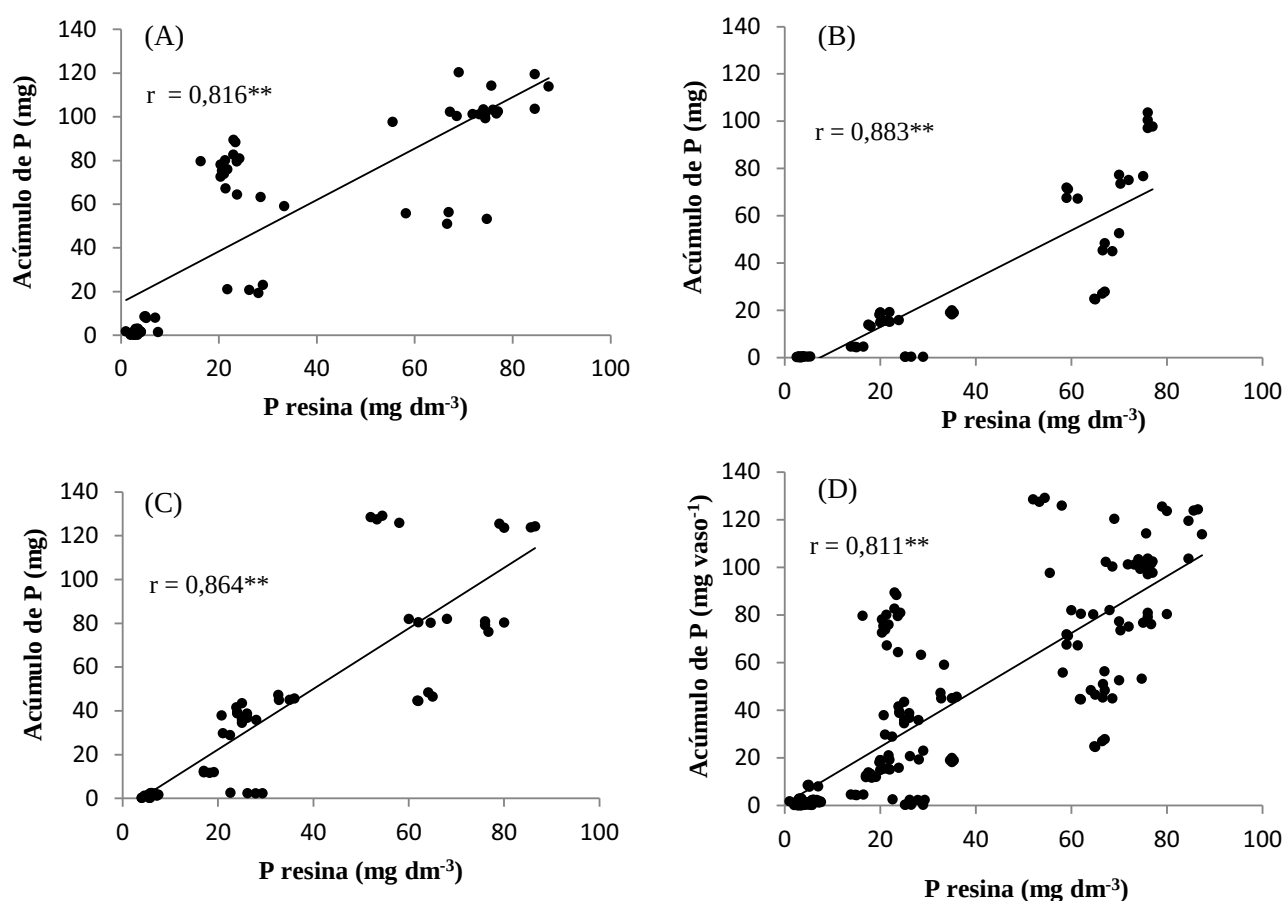


Figura 5: Correlação entre fósforo determinado pelos método resina de troca iônica e fósforo acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média e c) solo argiloso, d) todos os solos.

O método da resina se comporta bem por extrair formas lábeis de fósforo em processo similar ao das raízes das plantas, expressando o equilíbrio entre P-lábil e P-solução (RAIJ, 1991; STEFANUTTI, 1991; BARBOSA FILHO et al., 1987; GRANDE et al., 1986). A

resina, tendo menor influência sobre as formas não disponíveis de P-Ca no solo, apresenta vantagens, quando sob condições de adubação com fosfatos naturais (CABALA-ROSAND & SANTANA, 1981), onde os extratores ácidos são ineficientes (RAIJ et al., 1984).

Esses resultados corroboram alguns trabalhos encontrados na literatura, nos quais foram obtidos altos coeficientes de correlação entre o P do solo com o P absorvido pelas plantas (CABALA & WILD, 1982; BOWMAN et al., 1978; CRISANTO & SUTTON, 1973). Essa técnica, teoricamente apresenta a estimativa real do P disponível para as plantas.

Esses resultados são semelhantes aos verificados por Raij & Diest (1980), Cabala & Wild (1982), Braga et al. (1991) e Holanda et al. (1994), que consideram a resina como um dos métodos mais adequados para estimativa do P disponível em solos.

Observa-se também que os valores de correlação foram semelhantes para todos os solos estudados. Brasil & Muraoka (1997) demonstraram que os extratores Mehlich-3 e Bray 1 foram mais sensíveis às variações de solo do que a resina trocadora de íons. Lins & Cox (1989), trabalhando com sete solos de cerrado do Brasil, em casa de vegetação, com o teor de argila variando de 120 a 680 g kg⁻¹, verificaram que o extrator Mehlich-3 foi superior ao Bray-1 e à resina, na predição das necessidades de P para a soja, quando se considerava o teor de argila. Por outro lado, quando se considerava apenas o P extraível, a resina foi melhor.

Visando comparar a eficiência de extratores químicos e isotópico na avaliação da disponibilidade de fósforo no solo, Holanda et al. (1995), concluiu que os métodos de extração que melhor expressaram os teores de fósforo no solo disponíveis para as plantas foram Bray-1 e Resina, apresentando altas correlações com a produção de matéria seca da parte aérea e com o acúmulo de fósforo pelo arroz.

O extrator Mehlich-1, numa avaliação geral com todas as doses de fósforo, apresentou alta correlação com o P contido na parte aérea do milho (Figura 6), discordando de Holanda, et al. (1995). Verifica-se elevados coeficientes de correlação obtidos entre o P extraído pelo Mehlich-1 e o P acumulado na parte aérea.

Avaliando a disponibilidade de fósforo em amostras de solos representativos da Amazônia, Brasil & Muraoka (1997), observaram que o extrator Mehlich-1 apresentou baixas correlações com os parâmetros das plantas de caupi, o que parece estar relacionado com a elevada capacidade de extração de fósforo do método, mesmo em situações em que as plantas mostram dificuldades em absorver o elemento. Este fato discorda do presente

estudo, onde o extrator Mehlich 1 apresentou altas correlações com o fósforo acumulado pelas plantas.

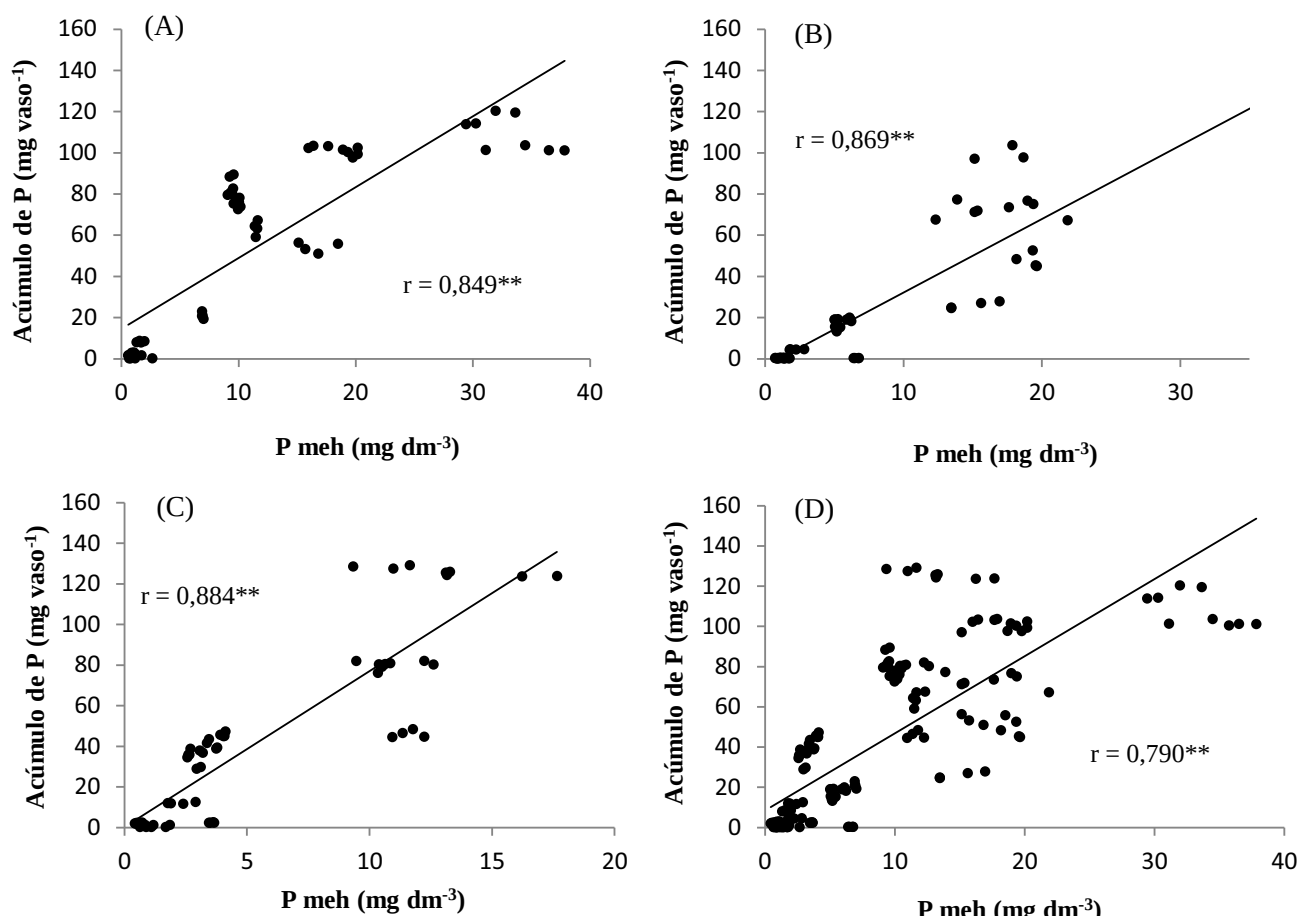


Figura 6: Correlação entre fósforo determinado pelo método Mehlich 1 e fósforo acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.

Comparando os dois extratores observam-se elevados coeficientes de correlação. Esses resultados demonstram que as reações do solo com os fertilizantes são quase totalmente completadas, quando são utilizados fertilizantes mais solúveis, pois os tratamentos receberam aplicação de superfosfato triplo. Assim, tanto a resina como os extratores ácidos podem ser utilizados satisfatoriamente; o que está de acordo com os resultados obtidos por outros pesquisadores (Sfredo et al., 1979; Corrêa & Haag, 1993; Holanda et al., 1994).

6.2.3 Teor e acúmulo de Si na parte aérea

Considerando o teor de Si na planta, houve efeito significativo da interação entre doses de P e os corretivos, estando o desdobramento apresentado na Tabela 18. Analisando os efeitos das doses de P dentro dos corretivos, verifica-se efeito significativo de Si para todas as doses de P ajustando-se a modelos quadráticos. Apenas para o tratamento onde não houve correção da acidez no solo argiloso, o ajuste foi linear. Nota-se que a aplicação de silicatos proporcionou em todas as doses os maiores teores de Si na planta quando se compara com o tratamento sem correção e com o tratamento que recebeu apenas calcário, o que é justificado pela concentração desse elemento na composição desses corretivos.

Tabela 18. Teor de Si em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Teor de Si (g kg ⁻¹)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	1,0 e ⁽¹⁾	4,9 d	7,8 c	11,5 b	15,1 a
50	7,1 d	7,8 d	17,7 a	11,4 c	13,9 b
150	8,1 e	10,2 d	11,3 c	16,9 a	16,3 b
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,10					
Solo de textura média					
0	1,2 e	6,8 d	13,7 c	20,1 a	15,7 b
50	2,9 e	12,5 d	15,4 c	22,6 a	18,6 b
150	4,4 e	11,8 d	11,4 c	21,4 a	19,9 b
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 2,07					
Solo argiloso					
0	3,1 e	10,0 d	16,7 b	13,2 c	28,0 a
50	5,6 d	12,5 c	15,1 b	23,6 a	23,9 a
150	10,6 e	13,9 d	15,4 c	18,1 b	19,7 a
Ef. de doses	L**(2)	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 1,97					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

Os teores de Si na planta são classificados como baixos quando menores que 17 g kg^{-1} ; médios, de 17 a 34 g kg^{-1} e altos acima de 34 g kg^{-1} (Korndörfer et al., 1999c). Observa-se, na Tabela 22, que o teor mais alto de Si no solo arenoso foi encontrado na dose intermediária de fósforo e com a aplicação de wollastonita, $17,66 \text{ g kg}^{-1}$. Faria (2000), estudando a tolerância do arroz-de-sequeiro ao déficit hídrico em Neossolo Quartzarênico, obteve resposta linear da aplicação de doses crescentes de silicato de cálcio sobre os teores de silício na parte aérea das plantas, com teores do elemento variando de $9,0$ a $21,0 \text{ g kg}^{-1}$ nesse solo, respectivamente, para doses de 0 a 600 kg ha^{-1} .

No solo de textura média observa-se que a escória forno de panela proporcionou maior teor de Si na parte aérea do milho em todas as doses de P utilizadas, sendo o valor máximo observado de $22,64 \text{ g kg}^{-1}$ na dose de 50 mg dm^{-3} . Já para o solo de textura argilosa a escória de aciaria proporcionou os maiores teores de Si nas plantas em todas as doses de P utilizadas.

Ao avaliar o efeito do composto mineral silicatado (Microton®) no acúmulo de fitomassa e de silício na planta de milho, comparado a Wollastonita, em dois solos (Latossolo e Argissolo), Fehr et al. (2011) observaram que o teor de silício nas plantas cultivadas no Argissolo foi superior para todos os tratamentos, em relação ao Latossolo. O maior teor de Si em relação ao controle ($6,2 \text{ g kg}^{-1}$) foi obtido no tratamento com composto mineral silicatado na dose de 50 kg ha^{-1} ($9,8 \text{ g kg}^{-1}$). Em trabalho com aplicação foliar de silício no milho, Goussain et al. (2002), observou teor médio de $6,5 \text{ g kg}^{-1}$ de Si. Estes valores são inferiores a todos os tratamentos encontrados no presente trabalho.

Ao avaliar a alteração na disponibilidade de fósforo, através das aplicações de fosfato e silicato, para o estabelecimento do capim marandu, Melo (2005), observou que as concentrações médias de silício na parte aérea do capim-marandu variaram de forma linear com o fornecimento de silício ao solo, oscilando de $9,9$ a $15,1 \text{ g kg}^{-1}$, dentro das doses estudadas, respectivamente para as condições de mais baixo e mais alto suprimento de silício. Ao avaliar a eficiência dos métodos de extração de Si (cloreto de cálcio, ácido acético, ácido cítrico e água), além de determinar a produção de matéria seca, teor e conteúdo de silício em plantas de milho em solo contaminado por chumbo, Araújo et al. (2011), observaram que a adição de doses crescentes de Si ao solo contaminado promoveu aumento linear e altamente significativo dos teores de Si na

parte aérea das plantas de milho que variaram entre 5 e 35 g kg⁻¹, valores superiores aos encontrados no presente trabalho.

Para o acúmulo de silício também observa-se interação significativa entre as doses de P e fontes de corretivos. Para os efeitos das doses de P dentro dos corretivos, nota-se que o modelo de curva quadrática foi o que melhor se ajustou aos dados, exceto apenas para o tratamento onde não houve correção da acidez no solo arenoso, onde o ajuste foi linear (Tabela 19).

Tabela 19. Acúmulo de Si em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Acúmulo de Si (mg vaso ⁻¹)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	0,5 b	12,2 b	18,9 b	58,4 b	123,4 a
50	209,6 e	516,1 d	1416,9 a	923,9 b	813,0 c
150	656,2 e	1253,4 d	1439,3 c	2246,3 a	2060,7 b
Ef. de doses	L**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,82					
Solo de textura média					
0	0,7 b	3,5 b	9,6 b	13,9 b	70,1 a
50	31,4 e	151,8 d	235,1 c	417,7 a	341,3 b
150	187,1 d	765,5 c	833,0 b	1595,0 a	1619,1 a
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 4,83					
Solo argiloso					
0	1,8 c	24,1 c	41,1 b	40,5 bc	333,0 a
50	115,6 e	807,2 d	509,8 c	839,7 b	976,2 a
150	455,0 e	872,6 d	1082,9 c	1578,2 b	1743,7 a
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,57					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

Para todos os solos estudados observa-se que houve aumento do acúmulo de Si na parte aérea do milho com o aumento das doses de fósforo em todas as fontes de corretivos utilizadas e também no tratamento sem correção. Os valores médios de acúmulo de Si na planta

foram maiores no solo de textura arenosa. As diferenças no acúmulo de Si com maiores valores para o solo arenoso, certamente estão relacionados à maior produção de biomassa neste solo, proporcionada pela maior disponibilidade de fósforo em razão da menor fixação, ou seja, embora haja variação na concentração de Si, o fator produção de matéria seca foi preponderante e isso se deve ao fósforo. Os valores intermediários de acúmulo de Si são observados no solo de textura argilosa, enquanto que o solo de textura média os valores médios para acúmulo de Si na parte aérea do milho foram os menores observados no presente estudo. Esses resultados discordam de Gomes et al. (2011), que ao avaliar os efeitos do tempo de incubação de fontes de silicato na disponibilidade e absorção de Si e no crescimento de plantas de arroz observou que o solo LVdf (textura média) apresentou o maior acúmulo de Si ($458,9 \text{ mg vaso}^{-1}$) aos 23 dias de incubação, enquanto o menor acúmulo de Si foi observado para RQo (textura arenosa), cujo valor máximo ($140,22 \text{ mg vaso}^{-1}$) foi verificado aos 26 dias de incubação.

Observou-se que a escória de aciaria foi a fonte que proporcionou maior teor e acúmulo de Si na parte aérea do milho. Segundo Lopes (1997) e Bittencourt et al. (2004), o pH mais elevado pode aumentar a disponibilidade de Si no solo, tanto pela liberação de Si pelas fontes silicatadas como pela solubilização de polissilicatos originais dos solos.

Ao avaliar a eficiência dos métodos de extração de Si (cloreto de cálcio, ácido acético, ácido cítrico e água), além de determinar a produção de matéria seca, teor e conteúdo de silício em plantas de milho em solo contaminado por chumbo, Araújo et al. (2011), observaram que o silício variou entre 400 e $1400 \text{ mg vaso}^{-1}$ em plantas de milho, resultados semelhantes aos encontrados no presente estudo.

Em extensa revisão sobre elementos minerais Epstein (1999), comenta que na literatura são encontrados teores de Si na matéria seca de parte aérea que variam de 0,1 a 10%, sendo também encontrados valores inferiores ou superiores a esses. Quando comparado aos níveis de outros elementos, como cálcio (0,1 a 0,6%) e enxofre (0,1 a 1,5%), o autor menciona que o Si está presente, em tecidos vegetais, em quantidades equivalentes às aquelas encontradas para macronutrientes ou mesmo em níveis superiores.

6.2.4 Correlação Si extraído do solo e acúmulo de Si na planta

As correlações dos solos de texturas argilosa, média, e os solos juntos foram positivas para os dois extratores. Não houve correlação somente no solo arenoso para o extrator ácido acético, conforme pode ser observado na Figura 7.

Analizando-se as correlações entre o acúmulo de Si nas plantas de milho e o teor de Si no solo, pelos diferentes extratores, verifica-se que o ácido acético apresentou correlação mais baixa quando comparado ao CaCl_2 (Figura 7 e 8). Somente no solo argiloso a correlação com o silício extraído pelo solo e o silício acumulado na planta foi um pouco maior do que o encontrado nos demais solos, quando no Neossolo Quartzarênico não houve correlação significativa entre o extrator ácido acético e o Si acumulado pela planta.

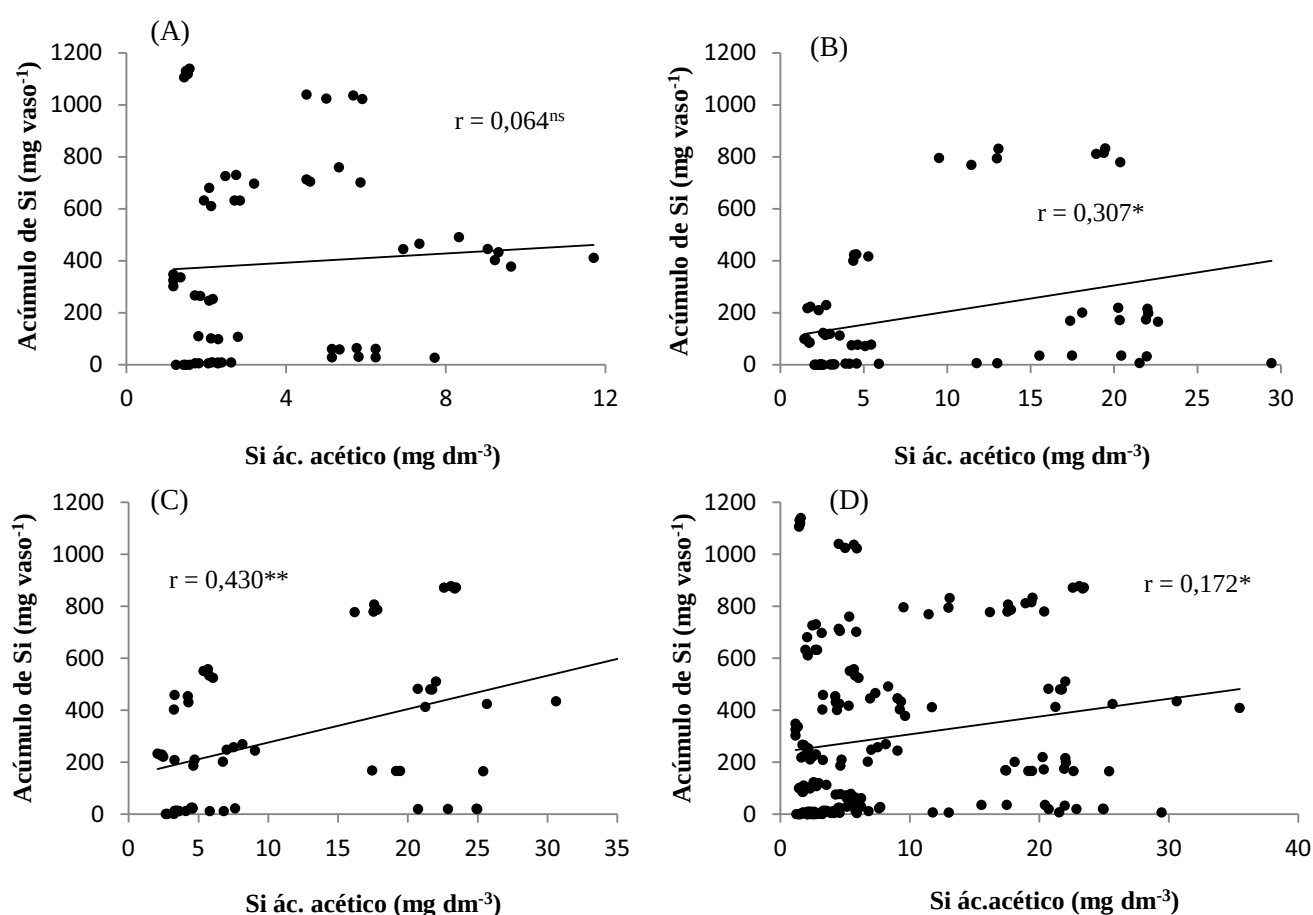


Figura 7: Correlação entre silício determinado pelo extrator ác. acético e silício acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.

Ao avaliarem extratores de Si em solos com aplicação e sem aplicação de silicato de cálcio, Barbosa Filho et al. (2001) concluíram que a extração com ácido acético foi a mais eficiente, na avaliação da disponibilidade de Si nos solos da área agrícola de Everglades na Flórida, sendo este extrator recomendado para os EUA. Resultados semelhantes também foram obtidos por Korndörfer et al. (1999), mas tais resultados não se confirmam quando se utilizam fontes de diferentes origens como foi o caso do presente estudo.

Ao avaliarem dois métodos de extração de silício (Si) em amostras de Latossolos cultivados com milho e sorgo, Inocêncio et al. (2010) observaram que no solo de textura argilosa a correlação entre o extrator ácido acético e Si acumulado na planta foi ($r^2 = 0,58^{**}$), resultado semelhante ao encontrado no presente estudo para solo argiloso.

Os resultados encontrados neste trabalho discordam dos encontrados por Kondorfer et al. (1999), que ao comparar diferentes extratores e o acúmulo de Si por planta de arroz observaram que houve relativamente pouca diferença entre os métodos de extração testados quanto à capacidade em estimar a disponibilidade do Si no solo para o arroz de sequeiro. Todos apresentaram elevado grau de correlação com o Si acumulado na parte aérea do arroz. Os coeficientes de determinação (R^2) foram de 0,88; 0,84; 0,70 e 0,69, respectivamente, para os extratores ácido acético, água, cloreto de cálcio $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$ e tampão pH 4,0. Neste mesmo estudo o extrator que apresentou o maior coeficiente de determinação foi o ácido acético.

Observa-se na Figura 8 que para o solo RQ (textura arenosa), houve correlação significativa entre o Si extraído por CaCl_2 e o Si acumulado pelas plantas de milho, ao contrário do que ocorreu com o extrator ácido acético que não apresentou correlação significativa para este tipo de solo. Isto pode ser explicado, provavelmente pelo seu método de extração, baseado no Si presente na solução do solo (KORNDÖRFER et al., 2004). Esse solo possui altos teores de areia e baixos teores de argila, sendo essa última fração a responsável pela adsorção do Si no solo (BORTOLON; GIANELLO, 2008). Com isso o Si presente no RQ permanece na sua maior parte na solução do solo, passível de ser determinado pelo extrator CaCl_2 . Korndorfer et al. (1999) identificam o baixo coeficiente de determinação para o extrator CaCl_2 , principalmente em solos com baixa concentração de Si. As diferenças encontradas entre esses extratores são atribuídas à ação em diferentes componentes da matriz do solo.

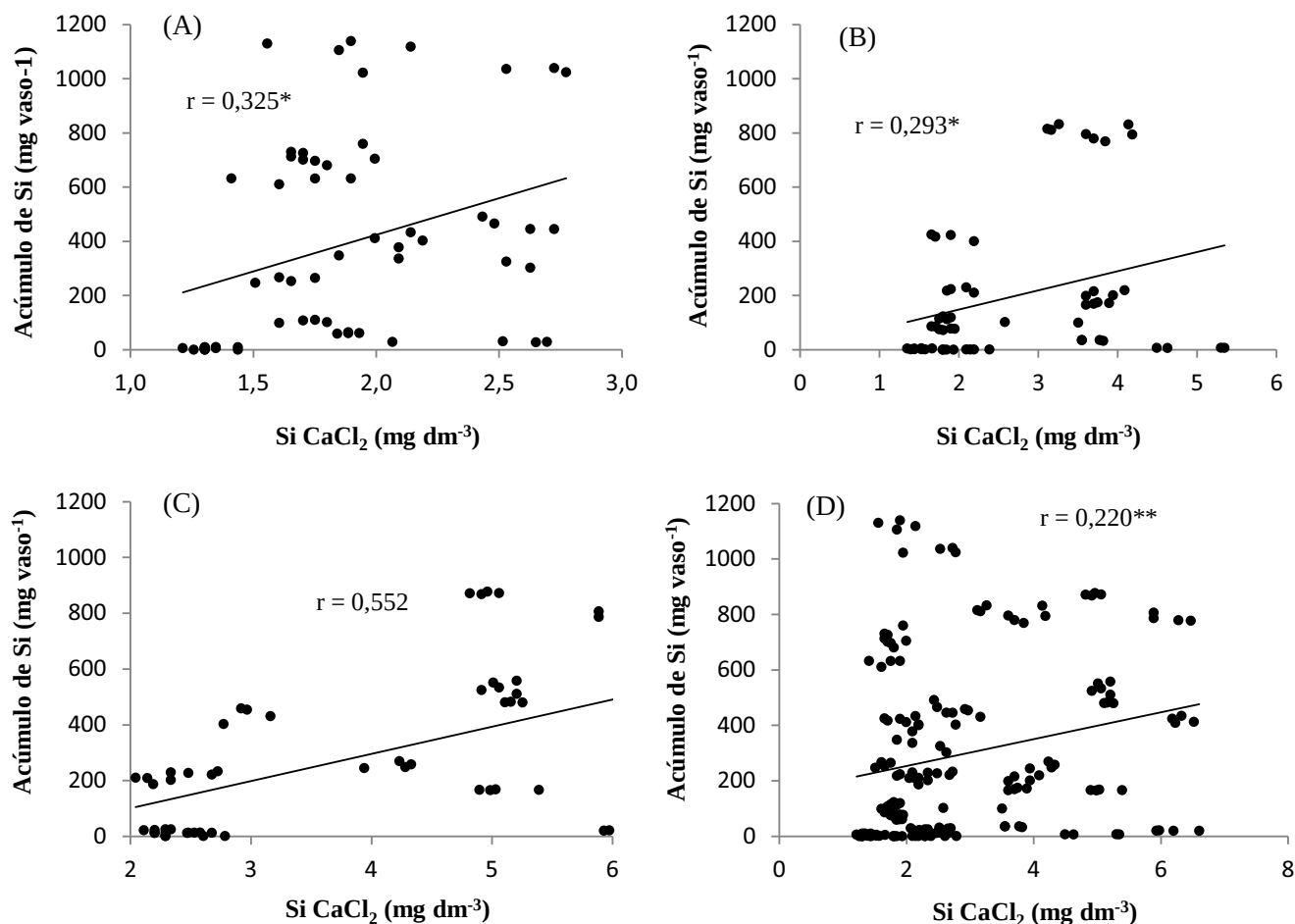


Figura 8: Correlação entre silício determinado pelo extrator CaCl_2 e silício acumulado pela planta a) solo arenoso; b) solo de textura média; c) solo argiloso e d) todos os solos.

A nível mundial não há um extrator considerado padrão para determinar o Si no solo. Prova disso é que o ácido acético $0,5 \text{ Mol L}^{-1}$ é o mais usado nos Estados Unidos (SNYDER et al, 2001), a solução tampão de acetato de amônio a pH 4,0 no Japão (Sumida, 2002) e cloreto de cálcio $0,01 \text{ Mol L}^{-1}$ na Austrália (BERTHELSEN et al., 2002).

Dessa forma, independentemente da solução utilizada, considera-se necessário que ela apresente correlação satisfatória entre o silício extraído e aquele absorvido pelas plantas. A solução de ácido acético foi a mais utilizada no Brasil (KORNDÖRFER et al.1999), mas alguns trabalhos têm mostrado que o pH pode influenciar de forma negativa, resultando em valores extraídos maiores que os realmente disponíveis às plantas (CAMARGO, 2003; QUEIROZ, 2003; DALTO, 2003). Conforme relatado por Vidal (2003), o extrator cloreto de cálcio ($0,01 \text{ Mol L}^{-1}$) pode apresentar maiores correlações entre o silício extraído no solo e a

quantidade de silício absorvida pela planta teste, porém ainda são necessários mais estudos sobre o assunto.

Comparativamente, pouca diferença existe entre os métodos de extração testados quanto à capacidade dos mesmos em estimar a disponibilidade do Si no solo para a cultura do milho. Os extratores testados apresentaram um baixo grau de correlação com o Si acumulado na planta. Um fator que deve ser considerado é a amplitude de valores que o extrator é capaz de proporcionar, pois quanto maior a amplitude, menor o erro de determinação laboratorial, o que foi observado com o extrator ácido acético. Por outro lado, o ácido acético pode superestimar o Si solúvel em solos que sofreram aplicação recente de fontes de silicato.

6.2.5 Índice de cor verde (ICV)

Observa-se que aos 15 dias após a emergência não houve interação entre as doses de fósforo e as fontes de corretivos para o índice de cor verde nas plantas mensurados através do clorofilômetro. Analisando isoladamente o efeito dos corretivos, observa-se que aos 15 DAE as fontes não diferiram entre si, sendo diferentes apenas do tratamento sem correção (Tabela 20), isto provavelmente porque nessa época de avaliação ainda não havia diferenças significativas na coloração das plantas dos tratamentos que receberam correção.

Tabela 20. Índice de cor verde em plantas de milho em função da aplicação de diferentes fontes de corretivos nos solos.

Corretivos	Clorofila 15 DAE		
	Solo arenoso	Solo de textura média	Solo argiloso
Sem correção	32,2 B ⁽¹⁾	31,05 B	30,42 B
Calcário	38,18 A	35,60 A	33,73 A
Wollastonita	37,36 A	34,88 A	34,37 A
Esc. FP	39,23 A	36,53 A	35,12 A
Esc. aciaria	38,10 A	35,90 A	34,37 A
C.V (%)	6,38	5,32	4,79

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%.

Nessa mesma época de amostragem, analisando isoladamente o efeito das doses de P no teor de clorofila das folhas do milho, observa-se efeito quadrático para o solo

arenoso, e ajustes lineares para os solos de textura média e textura argilosa (Figura 9). O efeito positivo das doses de P, na medida indireta da clorofila, possivelmente deve-se ao papel do P na nutrição das plantas, pois é componente do ATP, que fornece energia ao processo ativo de absorção do N (Malavolta et al. 1989), com reflexos na leitura SPAD.

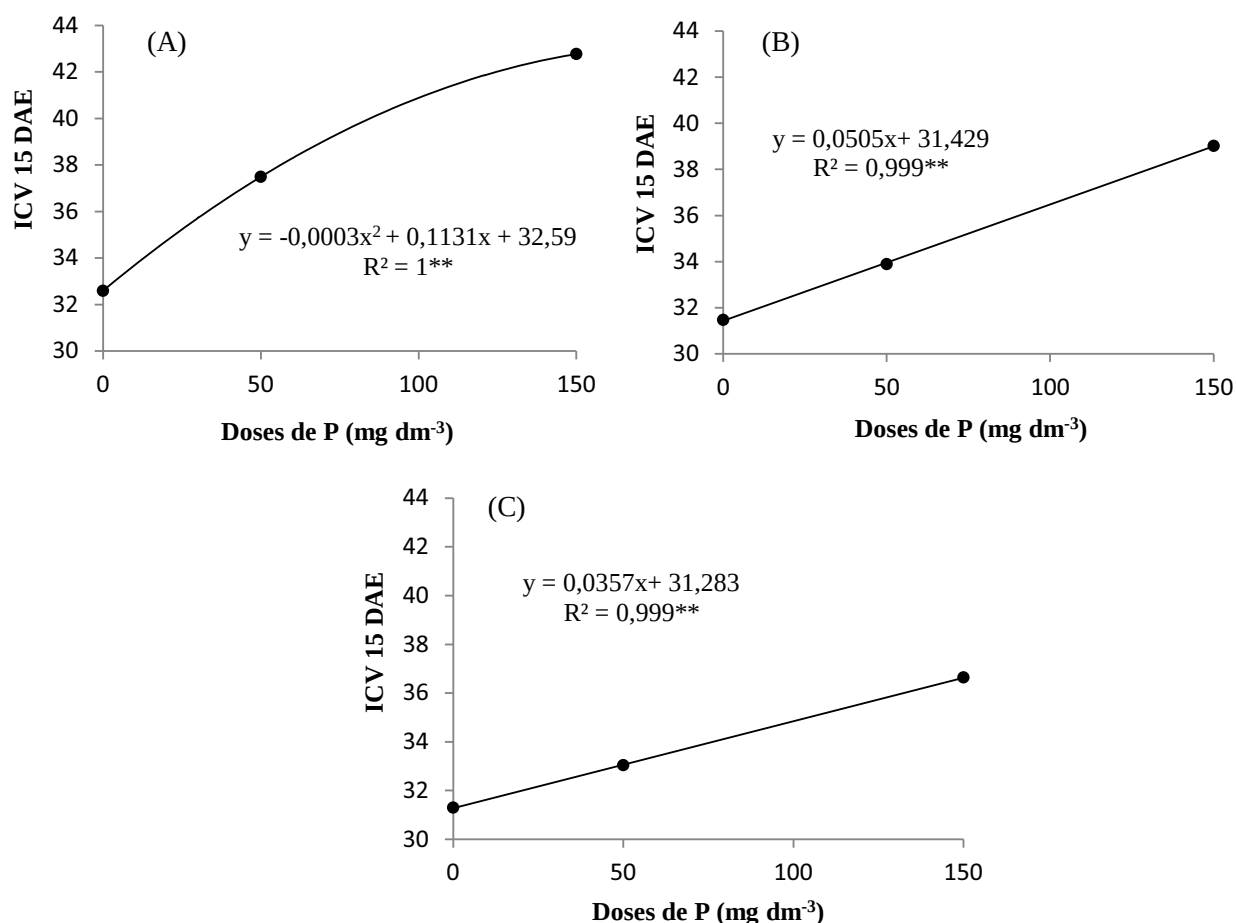


Figura 9: ICV em folhas de milho aos 15 dias após a emergência;
a) solo arenoso; b) solo textura média c) solo argiloso.

A concentração de clorofila nas folhas aumentou com as doses de fósforo aplicadas, nas avaliações a partir dos 30 dias após a emergência. Observa-se que houve interação entre as doses de P e as fontes de corretivos para os solos de textura arenosa e o solo de textura média, ajustando-se a modelos quadráticos e lineares. Já para o solo de textura argilosa, não houve interação entre as doses de P e os corretivos (Tabela 21). Entretanto, analisando isoladamente os

efeitos das doses de fósforo no solo argiloso observa-se comportamento quadrático em relação ao ICV nas folhas do milho nessa época de avaliação (Figura 10).

Tabela 21. Índice de cor verde aos 30 DAE em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Clorofila 30 DAE				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	21,8 c ⁽¹⁾	21,5 bc	25,6 bc	27,3 ab	31,4 a
50	36,9 b	43,1 a	43,0 a	46,9 a	44,9 a
150	53,4	59,6	56,5	58,7	59,0
Ef. de doses	Q*	Q**	Q**	Q**	Q*
C.V (%) 6,12					
Solo textura média					
0	22,0 b	24,0 ab	24,5 ab	25,2 a	27,4 ab
50	28,8 b	32,7 ab	32,1 ab	34,5 a	34,6 a
150	43,5 b	46,1 ab	47,8 ab	48,7 a	50,6 a
Ef. de doses	Q*(2)	L**	L**	L**	L**
C.V (%) 7,08					
Solo argiloso					
0	24,7	26,8	25,1	26,6	27,1
50	30,5	34,5	33,8	35,3	36,1
150	40,6	40,8	44,8	44,4	44,9
Ef. de doses	L*	L*	L**	L**	L**
C.V (%) 24,01					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

Tais observações estão associadas à elevação da concentração de nitrogênio no tecido foliar proporcionada pela adubação fosfatada, favorecendo a síntese de clorofila. Observa-se novamente que para os solos de textura média e de textura argilosa, as escórias proporcionaram os maiores teores de clorofila nesta época de avaliação. Somente no solo arenoso não houve diferença entre os corretivos a partir da adição de fósforo. Deren (2001) observou que a aplicação de Si confere maior índice de clorofila às folhas. Savant et al. (1999) verificaram que a aplicação de 15 t ha⁻¹ de silicato aumentou o índice de clorofila em 78 e 65 %, em cana planta e cana-soca, respectivamente.

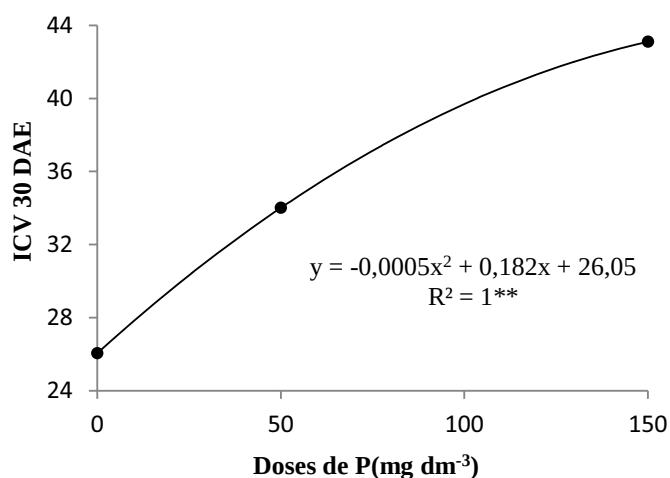


Figura 10: ICV em folhas de milho aos 30 dias após a emergência em solo de textura argilosa.

Para avaliação realizada aos 45 dias após a emergência, as regressões polinomiais mostraram que, para todas as fontes de corretivos, os índices de cor verde na planta responderam aos aumentos nas doses de fósforo segundo equações quadráticas e lineares (Tabela 22).

Observa-se que o ICV aos 45 DAE aumentou consideravelmente em relação às demais épocas avaliadas. Observa-se que no solo arenoso, os teores são maiores em relação aos demais solos estudados, evidenciado provavelmente à maior disponibilidade de fósforo neste solo, influenciando na elevação da concentração de nitrogênio no tecido foliar proporcionada pela adubação fosfatada, favorecendo a síntese de clorofila, como já foi citado anteriormente.

Ao avaliar a calagem e a adubação fosfatada na cultura da soja, Rosolem e Marcelo (1998) observaram efeito quadrático para a adubação fosfatada na concentração de N no sistema radicular de plantas de soja quando a saturação por bases estava em 50%. Stamford et al. (1999) em cultivo de Jacatupé (*Pachyrhizus erosus* L.) observaram efeito quadrático da aplicação de P na concentração de N na planta. Possivelmente, a maior leitura SPAD, com o aumento das doses de fósforo, seja justamente devido a essa interação entre o nitrogênio e o fósforo, que ao estar mais disponível na solução devido à interação com o silício proporcionou maior acúmulo de N nas plantas e consequentemente maior teor de clorofila, pois nos tratamentos onde não houve

adição de fósforo a leitura SPAD foi muito menor em relação aos demais tratamentos, justificada devido às plantas deficientes em P apresentarem um tom arroxeado.

Tabela 22. Índice de cor verde aos 45 DAE em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Clorofila 45 DAE				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	24,1 c ⁽¹⁾	31,6 b	33,7 b	35,9 ab	40,9 a
50	42,3 c	51,9 a	52,3 a	52,0 a	50,4 ab
150	49,7 b	56,8 a	57,0 a	50,9 ab	55,8 ab
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q*
C.V (%) 6,71					
Solo de textura média					
0	19,8 b	22,0 b	23,9 ab	21,2 b	30,5 a
50	26,2 b	39,1 a	40,2 a	38,4 a	39,7 a
150	43,6	47,8	50,2	50,3	50,3
Ef. de doses	L**	Q**	Q**	Q**	L**
C.V (%) 9,40					
Solo argiloso					
0	23,5 c	30,6 b	30,4 b	36,1 ab	38,9 a
50	39,2 b	44,6 ab	43,0 ab	42,7 ab	45,9 a
150	44,8	44,8	49,0	49,7	47,4
Ef. de doses	Q**(2)	Q**	Q**	L**	Q*
C.V (%) 7,16					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

Aos 60 dias após a semeadura observa-se interação entre as doses de fósforo e fontes de corretivos, ajustando-se a modelos quadráticos e lineares (Tabela 23). Observa-se também que não houve diferença entre os corretivos quando foi utilizada a maior dose de fósforo em todos os solos estudados com maiores teores no solo arenoso. Nota-se que no solo argiloso não houve interação com as fontes de corretivos, porém analisando isoladamente os efeitos das doses de fósforo, observa-se que o ajuste foi quadrático (Figura 11).

Tabela 23. Índice de cor verde aos 60 DAE em plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Clorofila 60 DAE				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	21,6 c	34,9 b	34,2 b	39,8 ab	43,7 a
50	43,8 b	49,8 ab	51,1 a	51,4 a	49,3 ab
150	50,3	51,3	51,7	50,8	52,0
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	L**
C.V (%) 6,95					
Solo de textura média					
0	16,8 c	22,0 bc	27,9 ab	30,3 a	33,6 a
50	23,9 b	43,6 a	42,6 a	43,4 a	44,8 a
150	45,0	51,5	48,3	49,2	49,3
Ef. de doses	L**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 8,64					
Solo argiloso					
0	28,5	34,5	37,5	40,1	41,6
50	40,7	44,2	43,1	43,8	45,5
150	44,2	47,4	48,7	51,9	49,3
Ef. de doses	L**	L*	L*	L*	N.S
C.V (%) 16,20					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$.

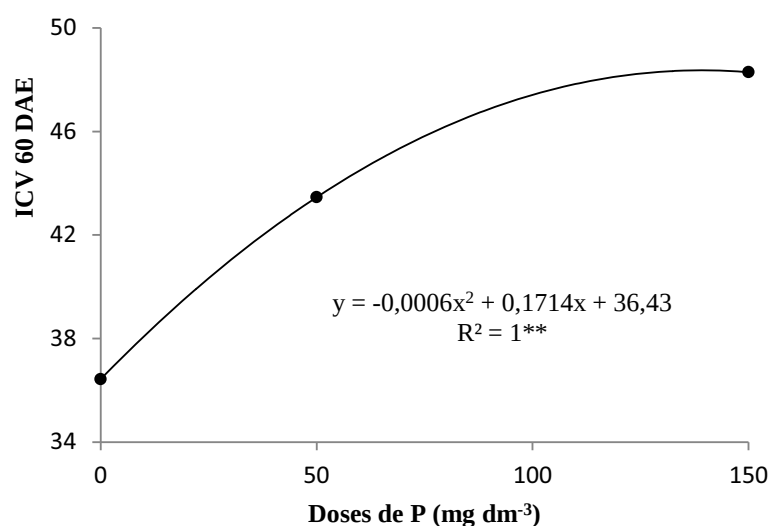


Figura 11: Teor de clorofila em folhas de milho aos 60 dias após a emergência em solo de textura argilosa.

Foram feitos estudos de correlação para cada época de leitura do índice SPAD com os teores de Si na parte aérea das plantas do milho, para verificar se há relação direta ou indireta do Si no aumento da taxa fotossintética das plantas (Figura 12). Observa-se que para a época de 15 dias após a emergência houve baixa correlação, porém significativa ($r = 0,280^{**}$) entre o índice Spad e os teores de Si na planta. Para a época de 30 dias após a emergência a correlação também foi baixa, porém significativa ($r = 0,161^{**}$). A correlação para época de 45 dias foi de ($r = 0,301^{**}$). A correlação foi significativa para a relação entre o teor de Si na planta e o índice SPAD aos 60 dias após a emergência ($r = 0,419^{**}$), sendo maior em comparação as demais épocas avaliadas. Esse maior índice em comparação às outras épocas possivelmente deve-se ao maior acúmulo de Si nas folhas nessa época, pois o silício polimerizado na superfície das folhas proporciona melhor arquitetura das plantas, proporcionando também maior inserção de luz aumentando a atividade fotossintética das folhas. O resultado é o aumento do acúmulo de clorofila, deixando a planta com cor verde mais intenso.

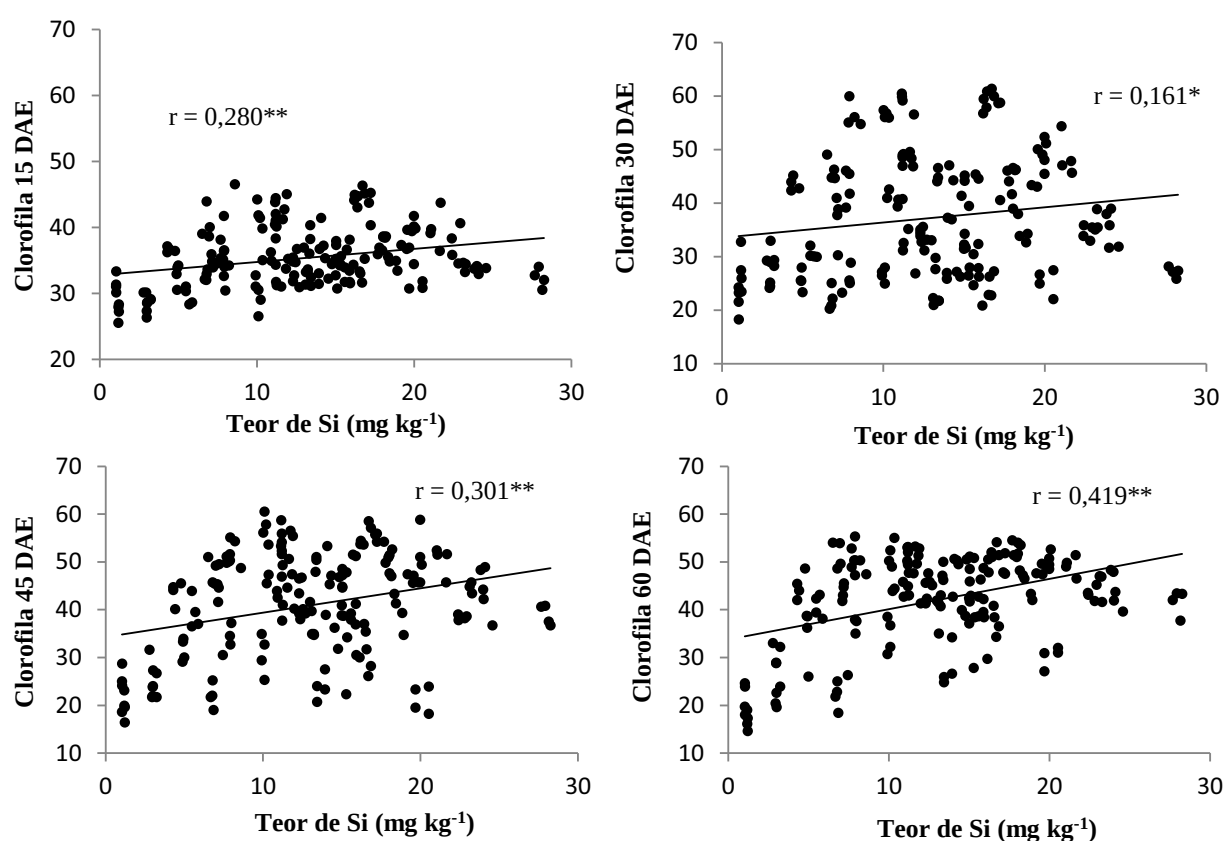


Figura 12: Correlação entre índice SPAD e teor de Si na parte aérea do milho aos 15, 30, 45 e 60 DAE.

Segundo Agarie et al. (1998), o silício pode ser uma das razões para o aumento da massa seca pela maior atividade fotossintética que proporciona. A capacidade de fotossíntese da planta pode ser aumentada pela maior absorção do silício, proporcionando melhor arranjo das folhas, tornando-as mais eretas.

O enxofre presente na composição do superfosfato triplo, mesmo que em pequenas quantidades, também pode ter contribuído para o aumento dos teores de clorofila principalmente nos tratamentos que receberam as maiores doses de P.

Alguns pesquisadores tem demonstrado relação entre índice de esverdeamento e teor de clorofila na folha em várias espécies de planta (Marquard e Tipton, 1987). Porém, existem poucos trabalhos que determinam a relação entre clorofila extraível, leitura do clorofilômetro e teores de fósforo, em diferentes estádios de desenvolvimento do milho.

6.2.6 Altura de planta e diâmetro de colmo

Os valores médios de altura de planta foram diretamente influenciados pela aplicação dos corretivos e doses de P. Observa-se na Tabela 24 que para todos os tipos de solos estudados e em todos os tratamentos as doses de P apresentaram comportamento quadrático e interação significativa com os corretivos.

No solo arenoso, observa-se que as escórias de aciaria e a escória forno de panela proporcionaram os maiores valores para altura de plantas nas doses de 0 e 50 mg dm⁻³ de P. Somente na maior dose de P a wollastonita apresentou o maior crescimento da planta, 240,26 cm. O calcário apresentou comportamento semelhante aos silicatos somente na dose 50, nas demais doses apresentou valores inferiores aos silicatos.

No solo de textura média as escórias, tanto a de aciaria como a forno de panela foram semelhantes para os valores de altura de plantas. O maior valor de altura de planta foi de 209, 21 cm com a aplicação da escória forno de panela na maior dose de P, sendo superiores aos demais corretivos e ao tratamento sem correção para todas as doses de P. Neste solo a wollastonita apresentou comportamento semelhante ao calcário, com os menores valores encontrados para altura de plantas.

No solo de textura argilosa novamente as escórias foram superiores aos demais corretivos e ao tratamento sem correção; a wollastonita obteve comportamento semelhante ao calcário.

De forma geral, observa-se que a aplicação de doses crescentes de P promoveu aumento na altura das plantas com ajuste polinomial quadrático para todos os solos. Severino et al (2006), trabalhando com mamona, em condições de campo, também verificaram resposta da cultura a adubação fosfatada para características de crescimento, como altura e diâmetro do caule.

Tabela 24. Altura de plantas de milho em função da aplicação de corretivos e doses de P nos solos.

Doses	Altura de planta (cm)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	24,9 e ⁽¹⁾	60,2 d	74,6 c	82,0 b	115,6 a
50	103,2 e	201,3 ab	192,7 c	204,3 a	199,4 b
150	192,3 d	219,2 c	240,3 a	227,5 b	222,6 c
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 1,10					
Solo de textura média					
0	24,3 d	31,6 c	35,3 b	38,0 b	58,9 a
50	81,5 e	124,8 c	120,1 d	140,9 a	129,9 b
150	160,8 e	168,9 d	174,1 c	209,2 a	191,7 b
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 1,65					
Solo argiloso					
0	32,1 e	48,0 d	62,9 c	80,3 b	129,5 a
50	92,2 e	148,4 c	144,1 d	157,7 b	164,1 a
150	171,6 d	187,6 c	199,4 b	223,1 a	199,6 b
Ef. de doses	Q**(2)	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 1,03					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

Observa-se que para esta variável as escórias foram melhores quando comparadas aos demais corretivos, o que pode ser influência da capacidade de reação desses materiais corretivos no solo, ou seja, maior e mais rápida liberação do silício para a solução,

consequentemente maior disponibilidade de P solos para as plantas de milho, justificando o maior crescimento das mesmas quando se utilizou escórias como corretivo.

Ao avaliar os componentes de produção do arroz irrigado a partir da aplicação de silício Marchesan et al. (2004), não observou influência da adubação silicatada para o parâmetro altura de plantas, discordando dos resultados encontrados no presente estudo, pois observa-se que os silicatos proporcionaram maior crescimento da planta em todos os solos estudados quando comparados ao tratamento sem correção e ao calcário. Assis et al. (2000), trabalhando com limitações nutricionais para a cultura do arroz em solos orgânicos sob inundação, não verificaram diferença no crescimento das plantas de arroz irrigado quando acrescentaram silício a adubação.

Ao avaliar a altura de plantas, diâmetro de caule e matéria seca da parte aérea do milho cultivado em amostras de um Latossolo Vermelho Distroférrico, fertilizadas com fosfato e escória de indústria siderúrgica, Gutierrez et al. (2008), observaram que a aplicação de escória de indústria siderúrgica não influenciou o diâmetro de caule e altura de plantas de milho, porém a fertilização fosfatada proporcionou efeito positivo no diâmetro de caule, altura de plantas da parte aérea do milho, independentemente da aplicação de escória agrícola. Leite (1997) observou ausência de efeito significativo da aplicação de Si sobre a altura de plantas e diâmetro de caule de plantas de sorgo.

Ao avaliar o efeito residual da escória de siderurgia comparada ao calcário, como fonte de silício no solo, no estado nutricional, desenvolvimento e produção de grãos da cultura do sorgo, Rocha et al. (2011), observaram que a altura das plantas não foi influenciada em função do emprego das fontes de corretivos utilizadas em nenhuma época de amostragem. Porém, ao avaliarem a altura das plantas em função das doses de material corretivo, observaram que houve um efeito significativo aos 30 e 90 dias após a emergência da cultura do sorgo, independente da fonte de material corretivo utilizada. Marcussi (2010) observou que apenas o uso das doses de escória promoveu incremento na altura das plantas de milho, não havendo efeito do uso do calcário. Esses estudos confirmam os resultados encontrados no presente estudo, pois ao comparar somente as fontes, observa-se que os silicatos proporcionam maior crescimento das plantas quando comparado ao calcário, como foi o caso das escórias utilizadas neste trabalho.

Para os valores médios de diâmetro do colmo observa-se efeito significativo e interação entre as doses de P e fontes de corretivos em todos os solos estudados (Tabela 25).

Observa-se que no solo arenoso os valores médios para diâmetro do colmo foram semelhantes para todas as fontes de corretivos utilizadas e o modelo quadrático foi o que melhor se ajustou em relação às doses de P. Nota-se que quando não houve aplicação de fósforo, ou seja, na dose 0, o diâmetro foi maior, 12,06 mm, e a fonte utilizada foi a escória de aciaria. Na dose de 50 mg dm⁻³ de P a wollastonita proporcionou maior valor de diâmetro do colmo, 20,35 e na maior dose de P, as escórias foram superiores.

Tabela 25. Diâmetro do colmo de plantas de milho em função da aplicação de corretivos e doses de P nos solos.

Doses	Diâmetro do colmo (mm)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	2,54 d ⁽¹⁾	6,63 c	7,04 c	8,46 b	12,06 a
50	11,39 c	18,93 b	20,35 a	19,20 ab	18,55 b
150	15,70 c	21,23 ab	20,41b	22,29 a	22,22 a
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,91					
Solo de textura média					
0	2,57 d	2,75 d	3,70 c	4,30 b	6,76 a
50	8,96 d	14,78 b	13,17 c	14,74 b	17,40 a
150	18,37 d	19,15 c	19,98 b	21,61 a	20,13 b
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 2,33					
Solo argiloso					
0	2,87 d	5,80 c	6,72 c	8,84 b	12,79 a
50	9,56 d	17,79 bc	16,70 c	18,46 ab	18,98 a
150	18,10 b	21,14 a	20,49 a	20,60 a	21,20 a
Ef. de doses	Q**(2)	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,67					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

No solo de textura média também se observa comportamento quadrático para as doses de P em relação as fontes de corretivos utilizadas e o mesmo que ocorreu no solo arenoso na dose 0 de P, ocorreu neste solo, ou seja, o maior valor de diâmetro do colmo foi obtido quando utilizou-se a escória de aciaria como corretivo, porém com diâmetro inferior, ao se comparar ao solo arenoso, possivelmente pela menor disponibilidade de fósforo neste solo, devido à maior adsorção, quando comparada ao solo arenoso, que possui menor capacidade de retenção.

Ao estudar o comportamento da cana soca e os atributos químicos do solo, em relação ao residual das doses de silicato de cálcio aplicadas no plantio Martins e Alovise (2010) observaram que os resultados obtidos indicaram alterações significativas no aumento da altura de plantas, diâmetro do colmo e número de perfilhos, comprovando o efeito positivo do residual da aplicação do silicato de cálcio para a cana soca.

Ao avaliar o efeito de doses de fósforo, utilizando-se como fonte o superfosfato simples, no diâmetro do caule de plantas de mamona, Carmo et al. (2010), observaram que o aumento das doses de fósforo proporcionaram acréscimos no diâmetro de caule, corroborando com os resultados encontrados no presente estudo, onde o aumento das doses de fósforo proporcionou maior diâmetro do colmo das plantas de milho.

6.2.7 Matéria seca de raiz

Observa-se efeito da interação doses de P x corretivos sobre a produção de matéria seca das raízes das plantas de milho. Pode se notar que em todos os solos estudados a aplicação de P influenciou significativamente as produções de matéria seca de raiz, ajustando-se ao modelo polinomial quadrático em todas as fontes de materiais corretivos utilizados (Tabela 26).

Ao comparar as produções máximas de matéria seca de raízes em cada solo, observa-se que no solo arenoso houve maior produção de matéria seca de raiz, quando comparado aos solos de textura média e argilosa. Possivelmente isso ocorreu pela maior disponibilidade de fósforo neste solo, devido ao menor poder de fixação do mesmo, possibilitando assim maior crescimento e acúmulo de massa de raiz. Nota-se que no solo arenoso, assim como ocorreu com o acúmulo de matéria seca da parte aérea, o calcário proporcionou maior valor de matéria seca de raiz (23,50 g), quando houve adição da maior dose de P ao solo. Semelhantemente também ao que ocorreu com a parte aérea nota-se que quando não houve adição de P ao solo, a

escória de aciaria novamente proporcionou maior acúmulo de matéria seca de raiz (1,21 g) em comparação ao calcário (0,50 g).

Observa-se que tanto no solo de textura média como no solo argiloso, a escória de aciaria proporcionou maior acúmulo de matéria seca de raiz em todas as doses de P. Somente no solo de textura média, na maior dose de P (150 mg dm^{-3}) a wollastonita foi semelhante a escória de aciaria proporcionando 19,20 g de matéria seca de raiz, enquanto a escória proporcionou 18,92 g. No solo argiloso a wollastonita foi semelhante às escórias somente na dose zero de P, nas demais doses obteve-se comportamento semelhante ao calcário e a escória de aciaria foi superior, proporcionando acúmulo de matéria seca de raiz de 17,16 g na maior dose de P, comprovando a capacidade do silicato de disponibilizar mais P do solo e refletindo positivamente na produção de matéria seca de raízes do milho.

Tabela 26. Matéria seca de raiz de plantas de milho em função de doses de fósforo e fontes de corretivos nos solos.

Doses	Massa seca de raiz (g)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	0,3 b ⁽¹⁾	1,0 ab	0,9 b	1,2 ab	2,4 a
50	7,0 c	19,7 b	20,2 ab	21,6 a	20,3 ab
150	24,9 c	47,0 a	42,5 b	42,9 b	41,5 b
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,95					
Solo de textura média					
0	0,2 a	0,4 a	1,1 a	0,7 a	0,9 a
50	1,5 c	3,8 ab	2,7 b	3,3 b	5,1 a
150	14,4 c	28,0 b	38,4 a	27,1 b	37,8 a
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 6,54					
Solo argiloso					
0	0,5 b	1,1 ab	1,5 a	1,5 ab	1,8 a
50	2,7 c	5,0 b	4,2 b	6,1 a	7,0 a
150	11,9 d	28,1 b	20,5 c	29,0 b	34,3 a
Ef. de doses	Q** ⁽²⁾	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 4,70					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: $P < 0,05$; **: $P < 0,01$

Souza et al. (2000), também demonstraram resultados significativos da adubação fosfatada sobre a produção de massa seca do sistema radicular de *Stylosanthes guianensis*. Por outro lado, Carneiro et al. (1999) não observaram efeito de doses de P sobre esse mesmo parâmetro. Em leguminosas, tais como o feijão e a soja, o suprimento de silício ao meio de cultivo foi responsável por aumentos no comprimento e massa das raízes (Horst & Marschner, 1978; Miyake & Takahashi, 1985).

Ao avaliar os efeitos do tempo de incubação de fontes de silicato na disponibilidade e absorção de Si e no crescimento de plantas de arroz Gomes et al. (2011), observaram que a produção de massa seca de raízes foi significativamente influenciada somente pelo fator solo, com a maior produção no solo argiloso, efeito intermediário para o solo de textura média e o pior efeito para o arenoso, em que os autores justificaram com base nos efeitos de uma mesma dose de Si aplicada aos solos, cujas características físicas, químicas, físico-químicas e mineralógicas são diferentes. Por exemplo, no solo argiloso, portanto com maior poder tampão, é provável que a solubilização das fontes de Si tenham sido menores, pelo fato de apresentar maior superfície de adsorção de íons, esses resultados discordam do presente estudo, pois o solo arenoso apresentou a maior produção de massa seca de raiz.

6.2.2 Matéria seca da parte aérea

A matéria seca da parte aérea foi influenciada pela interação doses de P x corretivos variando em função do solo, doses de fósforo e fontes de corretivos (Tabela 27). Pode-se notar que em todos os solos estudados a aplicação de P influenciou significativamente as produções de matéria seca da parte aérea, ajustando-se ao modelo polinomial quadrático em todas as fontes de materiais corretivos utilizados.

Para todos os solos estudados, no tratamento onde não houve correção da acidez, observa-se aumento da matéria seca, com o aumento das doses de fósforo. No solo arenoso, a dose zero de P, proporcionou um acúmulo de matéria seca de 0,26 g apenas, quando neste mesmo solo, na maior dose de P (150 mg dm^{-3}), o acúmulo de matéria seca foi de 40,33 g.

O P é indispensável em uma série de processos metabólicos dos vegetais, conforme verificado no experimento, no qual as plantas cultivadas em solos que não receberam aplicação desse nutriente apresentaram sintomas visuais típicos de deficiência deste nutriente. As

folhas mais novas do milho apresentaram coloração roxa intensa e as mais velhas apresentaram coloração bronze nas pontas, com morte de algumas folhas mais velhas. Verificou-se, também, reduzido crescimento da planta. Assim, observa-se alta resposta na produção de matéria seca em função das doses de P. Tratando-se de solos com baixos teores de P, era de se esperar que a adubação fosfatada promovesse aumentos significativos na produção de matéria seca.

Em relação às fontes de corretivos, as escórias proporcionaram resultados semelhantes, porém quando utilizou-se o calcário, observa-se maior acúmulo de matéria seca da parte aérea (66,16 g), na maior dose de P. Entretanto, nota-se que, quando não houve adição de P ao solo, ou seja, na dose zero, a escória de aciaria, proporcionou maior acúmulo de matéria seca, 5,37g e o calcário apenas 1,24 g.

Tabela 27. Matéria seca de plantas de milho em função da aplicação de corretivos e doses de P nos solos.

Doses	Massa seca (g vaso ⁻¹)				
	Sem correção	Calcário	Wollastonita	Esc. FP	Esc. Aciaria
Solo arenoso					
0	0,52 c ⁽¹⁾	2,48 bc	2,42 bc	3,86 b	10,74 a
50	29,30 d	66,28 b	80,22 a	80,74 a	58,40 c
150	80,66 d	132,32 a	123,42 c	126,44 b	126,90 b
Ef. de doses	Q*	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 2,15					
Solo de textura média					
0	0,52 b	0,58 b	0,70 b	0,70 b	4,46 a
50	10,68 d	15,30 b	12,18 c	18,44 a	18,32 a
150	42,10 d	64,82 c	73,32 b	74,68 b	81,50 a
Ef. de doses	Q**	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 4,61					
Solo argiloso					
0	0,58 c	2,40 bc	2,82 b	3,08 b	11,90 a
50	20,54 d	32,30 c	33,74 bc	35,68 b	40,72 a
150	42,98 d	62,44 c	70,26 b	86,96 a	88,70 a
Ef. de doses	Q** ⁽²⁾	Q**	Q**	Q**	Q**
C.V (%) 3,14					

(1) Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%. (2) L: efeito linear; Q: efeito quadrático; N.S. – não significativo.*: P<0,05; ** P<0,01

No solo de textura média, observou-se as menores produções de matéria seca. Inclusive na dose intermediária de fósforo, neste solo houve pouca diferença quando se compara com a dose zero. No solo arenoso, o acúmulo de matéria seca na dose 50 mg dm^{-3} de P foi de 14,65 g, enquanto que no solo de textura média, esse acúmulo não chegou a 1 g, correspondendo apenas a 0,34 g. Neste solo, ao contrário, do que se observa no arenoso, houve maior produção de matéria seca quando utilizou-se escória de aciaria em todas as doses de P, pois no solo arenoso, o acúmulo foi maior quando foi utilizado o calcário.

No solo de textura argilosa, o acúmulo de matéria seca foi semelhante ao solo de textura média, porém nota-se que quando utilizou as escórias, tanto a de forno de panela, como a de aciaria, o acúmulo de matéria seca foi maior em todas as doses de P utilizadas.

Ao avaliar os efeitos do tempo de incubação de fontes de silicato na disponibilidade e absorção de Si e no crescimento de plantas de arroz, Gomes et al., (2011), observou que para matéria seca da parte aérea, houve efeito significativo para solo, fonte de Si e para a interação solo x tempo de incubação. No conjunto dos solos e dos tempos de incubação, observaram melhor desempenho do silicato de cálcio para a produção de massa seca da parte aérea, o que pode ser atribuído à sua maior pureza e maior solubilidade, em comparação com a escória de siderurgia (Prado et al. 2001).

Ao avaliar, de forma indireta em plantas de eucalipto, a capacidade do silício, aplicado numa etapa posterior à fertilização fosfatada, em dessorver P de dois solos Carvalho et al., (2000), observou que a produção de matéria seca da parte aérea das plantas cultivadas nos dois solos estudados, aumentou, respondendo a incrementos das doses de Si, corroborando os resultados encontrados neste estudo, pois para o silício admite-se uma função metabólica (reações com pectinas e polifenóis; incorporação de fosfatos inorgânicos ao ATP e ADP), o que pode explicar a interação com as doses de P e aumento da massa de matéria seca nas plantas.

Ao avaliar a alteração na disponibilidade de fósforo, através das aplicações de fosfato e silicato, para o estabelecimento do capim marandu (*Brachiaria brizantha*), influenciando no número de perfilhos, na área foliar, no crescimento das raízes e na produção de massa seca desta forrageira Melo, (2005), observou interação significativa entre as doses de fósforo e de silício para a produção de massa seca da parte aérea do capim-Marandu nos dois cortes, ajustando-se ao modelo polinomial de regressão, concordando com os resultados obtidos

no presente estudo. Corrêa (1991) verificou resposta acentuada do capim marandu em um Latossolo Vermelho-Amarelo álico, quanto à produção de massa seca, com o aumento das doses de fósforo, até o equivalente a 140 mg dm^{-3} . Rossi (1995) também observou respostas na produção de massa seca desse mesmo capim até a dose de 300 mg dm^{-3} e até 700 mg dm^{-3} , respectivamente para o superfosfato triplo e para o fosfato de Araxá.

Ao avaliar as respostas diferenciadas do cultivo de arroz e milho à calagem e seus efeitos na disponibilidade de fósforo, Muniz (1995), observou que a produção de matéria seca e o acúmulo de fósforo na parte aérea das plantas de milho foram muito menos influenciados pelos efeitos indiretos do aumento do pH do que foram no arroz. Como consequência desse comportamento, as plantas de milho responderam melhor que as de arroz às variações do teor de fósforo provocados pela calagem nos Latossolos roxos estudados.

7. CONCLUSÕES

As escórias aumentaram os teores de fósforo no solo, quando comparadas ao calcário, sugerindo interação positiva entre Si e P nos solos oxídicos.

Os extratores Mehlich 1 e Resina apresentaram altas correlações com o P extraído e o fósforo acumulado pela planta, independente do solo e do material corretivo.

Para todos os parâmetros analisados na planta, houve interação significativa entre as doses de P e os corretivos utilizados, com maiores valores para o uso de silicatos.

Os teores de clorofila foram positivamente influenciados pelas doses de P e fontes de corretivos em todas as épocas de avaliação.

8. REFERÊNCIAS

AGARIE, S. et al. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 1, p. 96-103, 1998.

ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos**: características e interpretações técnicas. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1992. 26 p. (Boletim Técnico, 6).

ALCARDE, J. C. **Metodologia oficial de análise de corretivos de acidez**. Porto Alegre: Genesis, 2009. 58 p.

ALMEIDA, J. C. R. de. **Combinação de doses de fósforo e magnésio na produção e nutrição de duas braquiárias**. 1988. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

ALVAREZ, V. H. Correlação e calibração de métodos de análise de solos. In: ALVAREZ V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG, SBCS/UFV/DPS, 1996. p. 615-646.

ALVAREZ, V. H. et al. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Boletim Informativo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v. 25, p. 27-32. Viçosa, 2000.

ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Avaliação da disponibilidade do fósforo para os solos do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 127-336, 1974.

ANJOS, J. T.; ROWELL, D. L. The effect of lime on phosphorus adsorption and barley growth in three acid soils. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 103, p. 75-82, 1987.

ARANTES, V. A. **Aplicação de silício para arroz de sequeiro cultivado em material de quatro solos fase cerrado**. 1997. 42 f. Monografia (Graduação)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1997.

ARAÚJO, J. C. T.; NASCIMENTO, C. W. A.; CUNHA FILHO, F. F. Disponibilidade de silício e biomassa de milho em solo contaminado por chumbo tratado com silicato. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 5, p. 878-883, 2011.

ARGENTA, G. et al. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e de nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 13, p. 158-167. Rio Claro, 2001.

ARIAS, J. L.; FERNANDEZ, M. S. Role of extracellular matrix molecules in shell formation and structure. **World's Poultry Science Journal**, Santiago, v. 57, p. 349-357, 2001.

BAHIA FILHO, A. F. C. **Índice de disponibilidade e fósforo em latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas**. 1982. 178 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.

BAHIA FILHO, A. F. C. et al. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de latossolo do planalto central com diferentes características texturais e mineralógicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 221-226, 1983.

BALDEÓN, J. R. M. **Efeito da ação alcalinizante e do silício na eficiência do termofosfato magnésiano em solos ácidos**. 1995. 92 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

BARBOSA, D. S. et al. Correção da acidez do solo em profundidade e disponibilidade de silício proporcionados pela aplicação silicato e calcário em lisímetros. In: SIMPÓSIO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 2003, Lavras. **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003. 1 CD-ROM.

BARBOSA FILHO, M. A.; KINJO, T.; MURAOKA, T. Relações entre fósforo "extraível", frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 147-155, 1987.

BARBOSA FILHO, M. P. et al. Evaluation of soil test procedures for determining rice-available silicon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Everglades, v. 32, p. 1779-1792, 2001.

BARROW, N. J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 38, p. 183-230, 1985.

BECKWITH, R. S.; REEVE, R. Studies on soluble silica in soils. 1-The sorption of silicon acid by soils and minerals. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, v. 1, n. 3, p. 157-168, 1963.

BELANGER, R. R. et al. Soluble silicon, its role in the crop and disease management of greenhouse crops. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 74, n. 4, p. 329-336, 1995.

BERTHELSEN, S. **An assessment of the silicon status of soil in North Queensland, and the impact of sub-optimal plant available soil silicon on sugarcane production systems.** 2000. 261 p. Thesis (M.Sc.)-James Cook University, Townsville, 2000.

BERTHELSEN, S.; KORNDÖRFER, G. H. Methods for Si analysis in plant, soil and fertilizers. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3**Proceedings**. Universidade Federal de Uberlândia, 2005. p. 85-90. Uberlândia, 2005,

BERTHELSEN, S. et al. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2. **Proceedings**. Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition,. p. 57. Tsuruoka, 2002.

BERTHELSEN, S. et al. **Improving yield and ccs in sugarcane through the application of silicon based amendments:** final report: SRDC Project CLW009: CSIRO land and water. Melbourne: Sugar Research and Development Corporation, 2003.143 p.

BORTOLON, L. **Métodos de avaliação da disponibilidade de nutrientes para as plantas em solos do Rio Grande do sul.** 2005. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Ciência do Solo)-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BORTOLON, L.; GIANELLO, C. Interpretação de resultados analíticos de fósforo pelos extratores Mehlich-1 e Mehlich-3 em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1369-1377, 2008.

BOWMAN, R. A.; OLSEN, S. R.; WATANABE, F. S. Greenhouse evaluation of residual phosphorus methods in neutral and calcareous soils. **Soil Science Society of America Journal**, Salt Lake, v. 42, p. 451-454, 1978.

BRAGA, A. M. C. **Eficiência de fontes e doses de fertilizantes contendo silício na adubação do arroz inundado e do sorgo.** 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

BRAGA, N. R. et al. Eficiência agrônômica de nove fosfatos em quatro cultivos consecutivos de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 315-319, 1991.

BRASIL, E. D.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 599-606, 1997.

BRITO NETO, J. F. **Adsorção e disponibilidade de fósforo para o crescimento inicial de mamoneira em solos com diferentes classes texturais.** 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

CABALA R. P. C.; SANTANA, M. B. M. Disponibilidade de fósforo e sua diagnose pela análise de solo. In: MESA REDONDA SOBRE ADUBAÇÃO FOSFATADA NO BRASIL, 23., 1981, Salvador. **Anais...** Salvador: SBCS, 1981.

CABALA R. P.; WILD, A. Direct use of low grade phosphate rock Brazil as fertilizer. Effect of reaction time in soil. **Plant and Soil**, Hague, v. 65, n. 2, p. 351-362, 1982.

CAJUSTE, L. J.; KUSSOW, W. R. Use and limitations of the North Carolina method to predict available phosphorus in some oxisols. **Tropical Agronomy**, Trinidad, v. 51, p. 246-252, 1974.

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Solubilidade do silício em solos: Influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia**, Campinas, v. 66, p. 637-647, 2007.

CAMARGO, M. S. et al. Extratores de silício solúvel em solos: influência do calcário e fósforo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 21, n. 2, p. 9-19, 2005.

CAMARGO, M. S. C. et al. Soil reaction and absorption of silicon by rice. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 2, p. 176-180, mar./apr. 2007.

CAMPELLO, M. R. et al. Avaliação da reversibilidade de fósforo não lábil para lábil em solos com diferentes características. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 18, p. 157-165, 1994.

CARDOSO, K. **Aplicação de silicato de cálcio na recuperação de pastagem degradada de *Brachiaria decumbens***. 2003. 48 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Agronomia)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

CARNEIRO, C. E. A. et al. Calcário, potássio, fosfato e silício na produtividade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 465-470, 2006.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Efeitos da inoculação de fungos micorrízicos arbusculares e da aplicação de fósforo no estabelecimento de forrageiras em solo degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 9, p. 1669-1677, 1999.

CARVALHO, R. **Interações silício-fósforo em latossolo vermelho-escuro e cambissolo cultivados com mudas de eucalipto**. 1999. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

CARVALHO, R. et al. Adsorção de fosfato em solo com caráter ácrico avaliada por um modelo de complexação de superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 353-360, 1997.

CARVALHO, R. et al. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, p. 69-74, 2000.

CESSA, R. M. A.; NOVELINO, J. O.; MARCHETTI, M. E. Aplicação de metassilicato e fosfato influenciando os níveis de Si e P em um latossolo vermelho distroférico. In: SIMPÓSIO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 3., 2004, Uberlândia. **Anais...** Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 1 CD-ROM.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo e na disponibilidade de cálcio, magnésio e fósforo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 5, p. 75-82, 2008.

CORRÊA, L. A. **Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de *B. decumbens* Stapf, *B. brizantha* (Hochst.) Stapf. cv. Marandu e *P. maximum* Jacq., em latossolo vermelho-amarelo, álico.** 1991. 83 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CORRÊA, L. A.; HAAG, H. P. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich-1 e resina em latossolo vermelho-amarelo álico, cultivado com três gramíneas forrageiras. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, p. 287-294, 1993.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Adsorção de fósforo em dez solos do estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 153-159, 2011.

COUTO, W.; SANZONOWICZ, C.; LEITE, E. G. Adubação para o estabelecimento de pastagens consorciadas nos solos de cerrados. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: ALIMENTO E ENERGIA, 6., 1982, Brasília, DF. **Anais...** Planaltina: Embrapa, CPAC, 1982. p. 61-78.

CRISANTO, T.; SUTTON, C. D. Measurement of available phosphorus content of some Spanish soils. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 39, p. 399-412, 1973.

CURI, N. (Coord.) **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993.

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

DEREN, C. Plant genotypes, silicon concentration and silicon related responses. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.) **Silicon in Agriculture**, Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 149-158.

DEUS, A. C. F. **Avaliação de eficiência relativa para a reatividade em silicatos.** 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

DYNIA, J. F.; CAMARGO, O. A. Effects of liming, green manuring, and phosphate addition on electrochemical attributes of an Oxisol from central Brazil. **Soil Science and Plant**, Temuco, v. 29, p. 755-762, 1998.

EMADIAN, S. F.; NEWTON, R. J. Growth enhancement of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seedlings by silicon. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 134, p. 98-103, 1989.

ERNANI, P. R et al. Decréscimo da retenção de fósforo pelo aumento do pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p. 59-162, 1996.

FARIA, R. J. **Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 47 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

FARIA, L. A. et al. Efeito residual da silicatagem no solo e na produtividade do capim Marandu sob pastejo **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1209-1216, 2008.

FASSBENDER, H. W. **Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina**. 2. ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura, 1987. 420 p.

FEHR, M. R. et al. Avaliação preliminar da eficiência do composto mineral silicatado no desenvolvimento inicial do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011. Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2011.

FERREIRA, D. F. **SISVAR software**. Versão 4.6. Lavras: DEX/UFLA, 2003.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R. L. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p. 141-180.

FORTES, J. L. O. **Eficiência de duas escórias de siderurgia, do Estado do Maranhão, na correção da acidez do solo**. 1993. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.

FOX, R. L.; SILVA, J. A. Symptoms of plant malnutrition: silicon, and agronomically essential nutrient for sugarcane. In: JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. **An illustrated concepts in tropical agriculture**. Hawaii: University of Hawaii, 1978.

FOY, C. D. Efeitos do alumínio no crescimento das plantas. In: CARSON, E. W. (Ed.). **A raiz da planta e seu ambiente**. Charlottesville: University of Virginia, 1984. p. 601-642.

FOY, C. D. Soil chemical factors limiting plant root growth In: HATFIELD, J. L.; STEWART, B. A. **Limitations to plant root growth**. New York: Springer-Verlag, 1992. p. 97-149.

FRANCIS, C. A.; RUTTER, J. N.; PALMER, A. E. E. A rapid method for plant leaf area estimation in maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**, Madison, v. 9, n. 5, p. 538-539, 1969.

FREITAS, L. C. et al. Contribuição ao estudo da sílica solúvel em alguns perfis de solos. **Científica**, Jaboticabal, v. 5, n. 2, p. 296-305, 1977.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: Ed. UFLA, 2001. 252 p.

GALRÃO, E. Z.; VOLKWEISS, S. J. Disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 5, n. 2, p. 114-118, 1981.

GJORUP, G. B. et al. Avaliação do método do papel aniônico como extrator de fósforo disponível do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 17, p. 417-422, 1993.

GOMES, A. G.; GARGANTINI, H.; BLANCO, H. G. Comportamento de tipos de escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 24, p. 173-179, 1965.

GOMES, C. F. et al. Disponibilidade de silício para a cultura do arroz, em função de fontes, tempo de incubação e classes de solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 4, p. 531-538, out./dez. 2011.

GONÇALVES, G. K.; MEURER, E. J. Frações de fósforo no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 2, p. 357-362, 2009.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Cinética de adsorção de fósforo em solos de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 9, p. 107-111, 1985.

GOUSSAIN, M. M. et al. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta-do-cartucho *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 807-813. June, 2002.

GRANDE, M. A.; CURI, N.; QUAGGIO, J. A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos irrigados com arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 10, n. 1, p. 45-50, 1986.

HALLMARK, C. T.; WILDING, L. P.; SMECK, N. E. Silicon. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties**. 2nd. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1984. Pt. 2, p. 263-274.

HAVLIN, J. L. et al. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7th. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515 p.

HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, New York, v. 37, p. 249-315, 1984.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, London, v. 23, p. 177-191, 1972.

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

HOLANDA, J. S. et al. Eficiência de extratores de fósforo num solo adubado com fosfatos e cultivado com arroz. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 21., 1994, Petrolina. **Anais...** Petrolina: SBCE/Embrapa-CPATSA, 1994. p. 46-48.

HORST, W. J.; MARSCHNER, H. The effect of silicon on manganese tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). **Plant Soil**, Dordrecht, v. 50, p. 287-303, 1978.

INOCÊNCIO, M. F.; GUTIERREZ R. S.; NOVELINO J. O. Avaliação de métodos de extração de silício e fósforo em amostras de solos. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 75-83, 2010.

JOLLY, W. L. **A química dos não metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1966. 176 p.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria: SBCS/NRS, 1997. 31 p. (Boletim Técnico, 3).

KAMPRATH, E. J.; WATSON, M. E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, B. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. chap.16, p. 433-470.

KATO, N.; OWA, N. Dissolution of slag in water and calcium chloride solution: effects of solution pH and calcium concentration on solubilities of slag. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 67, p. 626-632, 1996.

KHALID, R. A.; SILVA, J. A.; FOX, R. L. Residual effects of calcium silicate in tropical soil. I- Fate of applied silicon during five years cropping. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 89-94, 1978.

KOCHHANN, R.; ANGHINONI, I.; MIELNICZVK, J. Adubação fosfatada no Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: OLIVEIRA, A. J.; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. J. (Ed.). **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, DF: EMBRAPA-DID, 1982. p. 29-60. (Documentos, 21).

KORNDÖRFER, G. H.; GASCHO, G. J. Avaliação de fontes de silício para o arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1., REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 313-316.

KORNDÖRFER, G. H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and yield. In: DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 133-147.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004a. 28 p. (Boletim Técnico, 1).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004b. 34 p. (Boletim Técnico, 2).

KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 101-106, 1999.

KROTH, P. L. **Disponibilidade de fósforo no solo para as plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membranas.** 1998. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação.** 1997. 84 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.

LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G.; TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 87, n. 1, p. 1-7, 1999.

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils.** New York: John Wiley, 1979. 449 p.

LINS, I. D. G.; COX, F. R. Effect of extractant and selected soil properties on predicting the correct phosphorus fertilization of soybean. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 813-816, 1989.

LOPES, A. S. **Solos sob Cerrado:** características, propriedades e manejo. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 162 p.

LOPES, M. S. **Relações entre pH e adsorção de P e Si em solos.** 1977. 117 f. Tese (Doutorado em solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.

LOPES, A. S.; VASCONCELLOS, C. A.; NOVAIS, R. F. Adubação fosfatada em algumas culturas nos Estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio Janeiro. In: OLIVEIRA, A. J. de; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. J. **Adubação fosfatada no Brasil.** Brasília, DF: EMBRAPA-DID, 1982. p. 137-200. (Documentos, 21).

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola:** adubos e adubação. São Paulo: Agronômica Ceres, 1967. 606 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola:** adubos e adubação. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas:** princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARCHESAN, E. et al. Controle do arroz-vermelho. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. (Ed.). **Arroz irrigado no Sul do Brasil.** Brasília, DF: Embrapa Informação, 2004. p. 547-577.

MARCUSSI, S. A. **Escória de siderurgia como material corretivo e fonte de silício para a cultura do milho no estado de São Paulo.** Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

MARQUARD, R. D.; TIPTON, J. L. Relationship between extractable chlorophyll and an *in situ* method to estimate leaf greenness. **HortScience**, Alexandria, v. 22, p. 1327, 1987.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINHÃO, D.; SOUSA, G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafós, 2004. p. 157-200.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 15, n. 3, p. 339-397, 1963.

MCKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, n. 1, p. 83-95, 1963.

MELO, S. P. **Silício e fósforo para estabelecimento do capim-marandu num latossolo vermelho amarelo**. 2005. 123 f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MELO, S. P. et al. Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 755-759, 2003.

MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role silicon for sugarcane in southern Africa. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 257-274.

MIOLA, G. R. **Extração de P, K, Ca e Mg do solo por diferentes métodos e avaliação da disponibilidade de P para as plantas**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Effect of silicon on the growth of soybean plants in a solution culture. **Soil Science Plant Nutrition**, Tokyo, v. 31, p. 625-636, 1985.

NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Parâmetros de isoterma de adsorção de P como critério de recomendação de adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, n. 1, p. 37-41, 1979.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo planta. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 276-374.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Ed. Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

NOVELINO, J. O. et al. Solubilização de fosfato-de-araxá, em diferentes tempos de incubação, com amostras de cinco latossolos, na presença e ausência de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 13-22, 1985.

OBIHARA, C. H.; RUSSEL, E. W. Specific adsorption of silicate and phosphate by soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 23, p. 105-107, 1972.

OLIVEIRA, M. G. A. **Determinação, adsorção e deslocamento recíprocos de silício e fósforo em latossolo do triângulo mineiro**. 1984, 88 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1984.

OLIVEIRA, F. H. T. et al. Comparisons of phosphorus availability between anion exchange resin and Mehlich-1 extractions among Oxisols with different capacity factors. **Communications in Soil Science and Plant**, Singapore, v. 31, p. 615-630, 2000.

OLSEN, S. R.; KHASAWNEH, F. E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLES, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Coord.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 361-410.

OTSUBO, A. A.; COUTINHO, L. M. Saturação por bases, cálcio e magnésio na produção de massa seca de alfafa (*Medicago sativa* L.). **Revista Cerrados**, Brasília, DF, v. 2, n. 1, p. 51-54, 2001.

PAIM, L. A. et al. Efeito do silício e do fósforo na disponibilidade de metais pesados do solo pelo extrator Mehlich-1. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 4, p. 780-787, 2003.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, New York, v. 30, p. 30-50, 1978.

PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. Sorção de fósforo em alguns solos do semi-árido do Nordeste Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, p. 1179-1184, 1998.

PEREIRA, H. S. et al. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, n. 2, p. 239-247, fev. 2007.

PEREIRA, H. S. et al. Fontes de silício para a cultura do arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 16, n. 5, p. 522-528, 2004.

PEREIRA, H. S. et al. Silicon sources for rice crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 522-528, 2004.

PIAU, W. C. **Efeitos de escórias de siderurgia em atributos químicos de solos e na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1995. 124 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

PLUCKNETT, D. L. **The use of soluble silicates in Hawaiian agriculture**. Queensland: University of Queensland, 1971. v. 1, p. 203-223.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Ed. UNESP, 2008. 407 p.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Efeito do calcário e da escória de siderurgia na disponibilidade de fósforo no latossolo vermelho-escuro e na areia quartzosa. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 74, p. 235-242, 1999.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p. 739-744, 2000.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 201-209, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 287-296, 2003.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p. 605-663.

PULZ, A. L. et al. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1651-1659, 2008.

QUEIROZ, A. A. **Interação do silicato de cálcio e magnésio granulado em mistura com adubos fosfatados solúveis**. 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado em Solos)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

QUEIROZ, A. A. **Reação de fontes de silício em quatro solos do cerrado**. 2003. 39 f. Monografia (Graduação em Agronomia)-Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

RAIJ, B. van. Algumas reflexões sobre análise de solo para recomendação de adubação. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill/SBSC, 1992. p. 71-87.

RAIJ, B. van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1991. 343 p.

RAIJ, B. van. Fósforo do solo. In: BÜLL, L. T.; ROSOLEM, C. A. **Interpretação de análise química de solos e planta para fins de adubação**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1989. p. 75-96.

RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 2, p. 1-9, 1978.

RAIJ, B. van; CABALA, R. P.; LOBATO, E. Adubação fosfatada no Brasil: apreciação geral, conclusões e recomendações. In: OLIVEIRA, A. J.; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. J.

(Ed.). **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa-DID, 1982. p. 1-19. (Documentos, 21).

RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 32, p. 223-231, 1973.

RAIJ, B. van; FEITOSA, C. T.; SILVA, N. M. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. **Bragantia**, Campinas, v. 43, n. 1, p. 17-29, 1984.

RAIJ, B. van. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. atual. Boletim Técnico do Instituto Agrônomo, Campinas, n. 100, 1997. 285 p.

RAMOS, L. A. **Reatividade de fontes de silício e sua eficiência na absorção e acumulação na cultura do arroz irrigado**. 2005. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

RAMOS, L. A.; KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Acúmulo de silício em plantas de arroz do ecossistema de várzea submetido à aplicação de diferentes fontes. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 751-757, 2008.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plant. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 58, n. 2, p. 179-207, 1983.

RESENDE, J. M. A. **Comparação de índices de sorção de fósforo no solo**. 1983. 79 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.

RESENDE, G. M.; SOUZA, R. J. Épocas de plantio e doses de silício no rendimento de alface tipo americana. **Horticultura Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, n. 3, p. 455-459, 2007.

ROCHA, L. C. M.; PRADO, R. M.; ALMEIDA, T. B. F. Efeito residual da escória de siderurgia como fonte de silício para cultura do sorgo. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, Uruguaiana, v. 18, n. 2, p. 101-115, 2011.

ROSOLEM, C. A.; MARCELLO, C. S. Crescimento radicular e nutrição mineral da soja em função da calagem e adubação fosfatada. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 3, p. 448-455, 1998.

ROSSI, C. **Crescimento e nutrição do braquiário em latossolos dos campos das vertentes (MG) sob influência da calagem e fontes de fósforo**. 1995. 65 f. Dissertação (Mestrado em Solos)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995.

ROY, A. C. et al. Influence of calcium silicate on phosphate solubility and availability in Hawaiian Latosols. In: SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY AND EVALUATION, 1971, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi: University of Hawaii, 1971. p. 756-765.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate in soils. In.: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. chap. 11, p. 263-310.

SANCHES, P. A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. (Ed.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 471-514.

SANCHEZ, P. A.; SALINAS, J. G. Low input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, New York, v. 34, p. 280-406, 1981.

SANYAL, S. K.; DE DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transmutation in soil. **Advances in Soil Science**, Boca Raton, v. 16, p. 1-120, 1991.

SATO, S.; COMERFORD, N. B. Influência do pH do solo na adsorção e dessorção de fósforo num ultisol úmido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 685-694, 2005.

SAVANT, N. K. et al. Silicon nutrition and sugarcane production: a review. **Journal of Plant Nutrition**, Houston, v. 12, p. 1853-1903, 1999.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Calibração de métodos de determinação de fósforo em solos cultivados sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 2037-2049, 2008.

SEVERINO, L. S. et al. Crescimento e produtividade da mamoneira adubada com macronutrientes e micronutrientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, p. 563-568, 2006.

SFREDO, G. J. et al. Comparação de cinco extratores de fósforo do solo, considerando-se o tempo de incorporação de três adubos fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 3, p. 111-115, 1979.

SILVA, J. T. A.; BRAGA, J. M. Sensibilidade de extintores de fósforo e nível crítico de dez solos do Estado de Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 39, n. 226, p. 542-53, 1992.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Avaliação da disponibilidade de fósforo, por diversos extratores, em amostras de solos cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p. 83-90, 1996.

SKOGLEY, O.; DOBERMANN, A. Synthetic ion-exchange resins: soil and environmental studies. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 25, p. 13-24, 1996.

SMYTH, T. J.; SANCHEZ, P. A. Effects of lime, silicate and phosphorus applications to an oxisol on phosphorus sorption and ion retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 500-504, 1980.

SNYDER, G. H. Methods for silicon analysis in plants, soils and fertilizers. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KONDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. p. 185-196.

SOLIS, P.; TORRENT, J. Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols of Spain. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 456-459, 1989.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado**. Informações Agronômicas, Planaltina, v. 102, p. 1-16, 2003. Encarte Técnico.

SOUZA, J. A.; CURI, N.; GUEDES, G. A. A. Relação entre mineralogia e adsorção de fósforo em alguns latossolos sob cerrado do planalto central. **Ciência e Prática**, Brasília, DF, v. 15, p. 103-111, 1991.

SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa-CPAC, 2004. p. 147-168.

SOUZA, R. F. et al. Atributos químicos de solos influenciados pela substituição do carbonato por silicato de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1563-1572, 2008.

SOUZA, R. F. et al. Influência de micorriza e fósforo sobre o rendimento de matéria seca e qualidade de *Andropogon gayanus* e *Stylosanthes guianensis* cultivados em um latossolo. **Pasturas Tropicais**, Cali, v. 22, n. 2, p. 34-41, 2000.

SPOSITO, G. **The surface chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1984. 234 p.

STAMFORD, N. P. et al. Efeito da fertilização com fósforo, potássio e magnésio em caupi infectado com rizóbio em um latossolo álico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, p. 1831-1838, 1999.

STEFANUTTI, R. **Efeito da granulometria do termofosfato magnesiano no aproveitamento do fósforo**. 1991. 76 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)-Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

SUMIDA, H. Plant available silicon in paddy soils. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka. **Proceedings...** Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002. p.43-49.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 147 p. (Boletim Técnico, 5).

TISDALE, S. L. et al. **Soil fertility fertilizers**. 5th. ed. New York: Macmillan Publishing, 1993. 634 p.

TOKURA, A. M. et al. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007.

VAHL, L. C. Fertilidade de solos de várzea. In: GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A. (Ed.). **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 119-162.

VAHL, L. C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. 1991. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

VASCONCELLOS, C. A. et al. Fósforo in OCB dois latossolos do Estado de Mato Grosso: I. Sorção de fosfato. **Experientiae**, Viçosa, MG, v. 18, p. 267-285, 1974.

VIDAL, A. **Efeito do pH na solubilidade de silício em solos da região do Triângulo Mineiro**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

VIÉGAS R. A.; NOVAIS, R. F.; SCHULTHAIS, F. Availability of a soluble phosphorus source applied to soil samples with different acidity levels. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 1125-1136, 2010.

VOLKWEISS, S. J.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 4., 1977, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Itatiaia, 1977. p. 317-332.

XU, G. et al. Assessing methods of available silicon in calcareous soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, n. 3, p. 787-801, 2001.