

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL
CAMPUS DE DOURADOS

**ABSORÇÃO DE FÓSFORO E CRESCIMENTO DO
SORGO EM FUNÇÃO DA PRÉ-APLICAÇÃO DE SILÍCIO
EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO**

RAPHAEL MAIA AVEIRO CESSA

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2005**

**ABSORÇÃO DE FÓSFORO E CRESCIMENTO DO SORGO EM
FUNÇÃO DA PRÉ-APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM UM
LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO**

RAPHAEL MAIA AVEIRO CESSA
Engenheiro Agrônomo

Orientador: PROFESSOR DR^o. JOSÉ OSCAR NOVELINO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre.

Dourados
Mato Grosso do Sul
2005

**ABSORÇÃO DE FÓSFORO E CRESCIMENTO DO SORGO EM FUNÇÃO DA
PRÉ-APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM UM LATOSSOLO VERMELHO
DISTROFÉRICO**

por

Raphael Maia Aveiro Cessa

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA

Aprovada em / /

Professor Dr^o. José Oscar Novelino / UFMS – DCA (Orientador)

Professor Dr^o. Antônio Carlos Tadeu Vitorino / UFMS - DCA

Professor Dr^o. Manoel Carlos Gonçalves / UFMS - DCA

Pesquisador Dr^o. Amoacy Carvalho Fabrício / EMBRAPA - CPAO

Professora Dr^a. Silvana de Paula Q. Scalon / UFMS - DCA

*A Jesus Cristo, que não me abandona,
Aos meus avós e pais pela vida, paciência e confiança,
A minha filhinha amada Cecília,
A você, Ioiá...*

Dedico

Agradecimentos

Ao povo brasileiro, financiador desta e de tantas outras pesquisas.

A professora Marlene Estevão Marchetti e a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, pela oportunidade.

Aos amigos que encontrei neste caminho: Adriana, Andréia, Canela, Elmo, Zorro, Têta, Lúcia, Zóio, Alemão e Cabeça Fria. Viva aê!

Ao amigo Francisco Caminatti. Vários sons!

Aos laboratoristas: Deuzelino Marques da Silva, Elda Barrios de Azambuja Silva, Nilda Tiyoko Kobayashi Hoffmann, Olinda Eva Pezarine e Wanderlei Pezarine Grepe. Obrigado pelo começo de tudo.

Ao professor José Oscar Novelino, pelo respeito, paciência e confiança

Aos professores Antônio Carlos Tadeu Vitorino, Manoel Carlos Gonçalves e Walber Gavassoni, sempre presentes.

ABSORÇÃO DE FÓSFORO E CRESCIMENTO DO SORGO EM FUNÇÃO DA PRÉ-APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM UM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO

Autor: Raphael Maia Aveiro Cessa
Orientador: Prof. Dr. José Oscar Novelino

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar componentes de crescimento e absorção de fósforo (P) pelo sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), bem como a recuperação de P no solo por diferentes extratores químicos (Mehlich 1, Mehlich 3 e Olsen), em função do Si aplicado antecipadamente à fertilização com doses de P. O trabalho foi realizado em casa de vegetação da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados, em Dourados, MS - Brasil. O experimento foi instalado no delineamento em blocos casualizados com quatro repetições, em arranjo fatorial 5 x 5, sendo os tratamentos constituídos por cinco doses de silício (Si) (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³ de Si) e cinco doses de P (0; 160; 280; 420 e 560 mg dm⁻³ de P). As fontes de Si (metassilicato de sódio) e P (fosfatos de amônio e de sódio) foram utilizadas na forma de reagentes analíticos. Durante 35 dias foram cultivadas seis plantas de sorgo da cultivar BR – 304, por vaso contendo 1,4 dm³ de amostras de um Latossolo Vermelho Distroférico, argiloso. A reposição dos teores de água perdida por evapotranspiração teve o seu controle realizado por meio de pesagens dos vasos durante todo o período experimental. Na colheita da parte aérea das plantas avaliou-se a estatura, o diâmetro de colmo e a matéria seca, além dos conteúdos de Si e P na matéria seca da parte aérea. No solo, após a colheita do sorgo, foram avaliados os conteúdos de Si (por solução de cloreto de cálcio 2,5 mmol L⁻¹) e P (pelos extratores Mehlich 1, Mehlich 3 e Olsen). As características da planta de sorgo MSPA, DICO e ESPL foram significativas influenciadas somente pelas doses de P, enquanto para PPA os efeitos foram significativos para Si e P e, para o SIPA, tais efeitos foram para Si, P e para a interação Si x P. A máxima produção de MSPA obtida em função da aplicação de P no solo foi de 3,41 g vaso⁻¹, alcançada com a dose estimada de 298,94 mg dm⁻³ de P. O P acumulado na massa seca da parte aérea do sorgo (PPA) foi significativamente afetado apenas pelo Si e P aplicados no solo. Por meio de equações de regressão, ajustada no conjunto das doses de P que, para a elevação de cada unidade de PPA há necessidade da aplicação de 11,80 mg dm⁻³ de Si ao solo, na forma de metassilicato de sódio. Correlações significativas foram observadas entre os teores de P extraídos pelos extratores Mehlich1, Mehlich3 e Olsen e características da planta e solo avaliadas, com melhor destaque para o Olsen. Concluiu-se que a absorção de P pelo sorgo aumentou linearmente com a aplicação de Si antecipadamente à fertilização com fosfato e influenciou positivamente a taxa de recuperação do P aplicado, que foi mais bem detectada pelo extrator Olsen. As características da planta de sorgo como matéria seca da parte aérea, diâmetro de colmo e estatura de planta foram significativamente influenciadas somente pelas doses de P.

Palavra-chave: *Sorghum bicolor* L; fertilização com Si e P; solo sob Cerrado

PHOSPHORUS ABSORPTION AND GROWTH OF SORGHUM IN FUNCTION OF PRE-APPLICATION OF SILICON IN A RHODIC FERRASOL

Author: Raphael Maia Aveiro Cessa
Adviser: Prof. Dr. José Oscar Novelino

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the growth and phosphorus (P) absorption by sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), as well as the P recuperation in the soil for different chemical extractants, when silicon (Si) was firstly applied to P fertilization. The work was realized under greenhouse conditions at the Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados in Mato Grosso do Sul Estate, Brazil. The experimental design was randomized blocks, with four replications, in a factorial scheme 5x5. The treatments were composed by five levels of Si (0, 100, 200, 300 e 400 mg dm⁻³) and P (0, 160, 280, 420 e 560 mg dm⁻³). The source of Si (sodium metasilicate) and P (sodium and ammonium phosphate) were analytic reagents. Six sorghum plants (BR – 304 cultivar) were cultivated, in black polyethylene vase contained samples of Rhodic Ferrasol for 35 days. The moisture reposition was realized through weight during experimental period. At harvest of sorghum were evaluated the characteristics of the plant, such shoot dry matter (MSPA), stem diameter (DICO) and plant stature (ESPL), as well as Si and P accumulated in the shoot matter dry (SIPA and PPA respectively). In the soil, were evaluated the contents of Si (2,5 mmol L⁻¹ CaCl₂) and P (Mehlich 1, Mehlich 3 and Olsen extractors). The characteristics of plants shoot matter dry, stem diameter and plant stature were only significantly influenced by P application in the soil. However, for PPA the effects were significant for the separate application of Si and P in the soil. For SIPA, the effect observed was for interaction SixP applied in the soil. The yield maximal of MSPA was obtained in function of P application was 3,41 g vase⁻¹ reached with the estimate level of 298,94 mg dm⁻³ of P. The PPA was only affected significantly by Si and P application in the soil. Through of regression equation adjusted for the P levels conjunct, it was noted that to rise one unity of PPA is necessary to apply 11,80 mg dm⁻³ of Si in the soil, which had as source sodium metasilicate. There were significant correlations among the P concentrations extracted by Mehlich1, Mehlich3 and Olsen and plant characteristic. The Olsen extractor was the better extractor to correlation with PPA. The P absorption by sorghum it had linear rose with the anticipated application of Si to P fertilization and this influenced positively the tax of recuperation of applied P. The plant characteristics MSPA, DICO and ESPL were only significantly influenced by P levels applied in the soil.

Key-words: *Sorghum bicolor* L; fertilization with Si and P; soil under Cerrado

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO	11
REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 O sorgo.....	13
2.2 O fósforo (P)	13
2.2.1 Adsorção de fósforo (P) no solo	14
2.2.2 Extratores de fósforo (P) no solo	16
2.3 O silício (Si).....	17
2.4 Competição de silício (Si) e fósforo no solo (P) pelos sítios de cargas adsorptivos	20
MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 Local do experimento	21
3.2 Análises estatísticas	21
3.3 Coleta, caracterização e tratamento da amostra de solo	22
3.4 Aplicação do silício (Si) no solo.....	23
3.5 Aplicação do fósforo (P) e demais nutrientes no solo	23
3.6 Plantio e manejo da cultura nos vasos sob casa de vegetação	24
3.7 Análise do fósforo (P) no solo	24
3.8 Determinação do silício (Si) no solo.....	25
3.8.1 Preparo das soluções para determinação colorimétrica do silício (Si)	25
3.8.2 Calibração do espectrofotômetro – determinação silício (Si).....	26
3.9 Análise química do tecido vegetal	26
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.3 Avaliação das características do solo.....	36
CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Exemplo de uma reação de adsorção do íon com o metal presente na estrutura do mineral.	15
FIGURA 2. Massa seca da parte aérea (MSPA) do sorgo em função da aplicação de fósforo (P).....	31
FIGURA 3. Diâmetro de colmo (DICO) do sorgo em função da aplicação de fósforo (P).....	31
FIGURA 4. Estatura da planta (ESPL) de sorgo em função da aplicação de fósforo (P).....	32
FIGURA 5. P acumulado na parte aérea (PPA) em função de fósforo (P) aplicado.	33
FIGURA 6. P acumulado na parte aérea (PPA) em função de silício (Si) aplicado..	34
FIGURA 7. Silício na massa seca da parte aérea (SIPA) em função da aplicação de silício (Si) e fósforo (P) no solo.....	35
FIGURA 8. Silício no solo extraído por CaCl_2 (SISC) em função da aplicação crescente de silício (Si) no solo.	39
FIGURA 9. Silício no solo extraído por CaCl_2 (SISC) em função da aplicação de fósforo (P) no solo.	40
FIGURA 10. P extraído pelo Mehlich 1 (PME1) em função de silício (Si) e fósforo (P) aplicados ao solo.	41
FIGURA 11. P extraído pelo Mehlich 3 (PME3) em função de silício (Si) e fósforo (P) aplicados ao solo.	41
FIGURA 12. Fósforo (P) extraído pelo Olsen (POLLS) em função de fósforo (P) aplicado ao solo.	42
FIGURA 13. Fósforo (P) extraído pelo Olsen (POLLS) em função de silício (Si) aplicado ao solo.	43
FIGURA 14. pH do solo em função da aplicação do silício (Si) no solo.....	45
FIGURA 15. pH do solo em função da aplicação do fósforo (P) no solo.	45

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. Teor total de SiO ₂ , CaO, MgO e poder de neutralização (PN) de algumas fontes silicatadas.....	19
QUADRO 2. Curva de calibração com soluções padrão para espectrofotômetro na análise do silício (Si) extraído pelo CaCl ₂ 2,5 mmol L ⁻¹	26
QUADRO 3. Curva de calibração com soluções padrão para espectrofotômetro na análise do silício (Si) na massa seca da parte aérea.....	27
QUADRO 4. Coeficientes de correlação linear simples entre características do solo e planta.....	28
QUADRO 5. Valores médios para as características das plantas de sorgo avaliadas em função da aplicação de silício (Si) e fósforo (P) no solo.....	29
QUADRO 6. Quadrados médios da análise de variância da produção de matéria seca da parte aérea, estatura de plantas, diâmetro de colmo, silício (Si) e fósforo (P) na parte aérea, em função da aplicação de Si e P no solo.....	30
QUADRO 7. Teores de P recuperados pelos extratores Mehlich1, Mehlich 3 e Olsen, Si solúvel em cloreto de cálcio e pH do solo, após o cultivo do sorgo, em função de doses de silício (Si) e fósforo (P) aplicadas no solo.	37
QUADRO 8. Quadros médios da análise de variância de fósforo (P) recuperado pelos extratores Mehlich 1, Mehlich 3 e Olsen, silício (Si) solúvel em cloreto de cálcio e pH do solo, em função de doses de Si e P aplicadas.....	38

INTRODUÇÃO

Os solos tropicais, principalmente os oxídicos, possuem características predominantes como: baixos valores de pH, bases trocáveis e problemas de fitotoxidez de alumínio. (OTSUBO et al., 2001), Esses fatores são muitas vezes responsáveis pelas limitações do uso agrícola dos solos, que podem ainda agravar-se com a falta de práticas de fertilização (MONCADA et al., 1991).

A quantidade de fósforo (P) e sua disponibilidade para os vegetais continua sendo alvo de inúmeras pesquisas envolvendo problemas de adsorção e dessorção em solos tropicais intemperizados, visto a predominância de uma mineralogia oxídica, contendo hematita, goethita e gibbsita, além de outros minerais como caulinita (FERNANDES et al., 2004; MANFREDINI et al., 2004; VALLADARES et al., 2003; ARAÚJO e SALCEDO, 1997; BAHIA FILHO et al., 1982), e a rápida passagem do P para formas insolúveis (VASCONCELLOS et al., 1982). Para minimizar o problema de adsorção de P nos solo tem-se utilizado fontes fosfatadas solúveis, capazes de promover acréscimos nos rendimentos das culturas (SCIVITTARO et al., 1997), aumentando rapidamente sua concentração no solo em um curto intervalo de tempo (NETO E SOBRINHO, 1977), e aplicações contínuas de doses agronomicamente viáveis, diminuindo a necessidade das adubações fosfatadas à medida que os solos são cultivados (DYNIAS e CAMARGO, 1997). Do P acumulado nos solos ao longo dos cultivos parte encontra-se disponível às plantas (P - lábil), e outra parte não, pelo menos a curto prazo (P não lábil) (NOVAIS et al., 1990). Sua concentração na solução de equilíbrio é dependente do tempo de reação do P com as partículas do solo, da dose utilizada e da capacidade residual dos fertilizantes (ARAÚJO e SALCEDO, 1997; ALVAREZ et al., 1990).

No Brasil, as pesquisas de avaliação agrônômica das fontes fosfatadas aumentaram consideravelmente face à elevação dos preços destes fertilizantes e da dependência do país pelo suprimento exterior. (DEFILIPPE, 1999; BRAGA et al, 1980). Como alternativa às técnicas de manejo da fertilidade de solo, em específico para o fenômeno de adsorção de ânions, tem-se a competição de elementos químicos por sítios de adsorção nas superfícies dos minerais de argila. Vários compostos comuns no solo

são capazes de adsorver Si, entre eles as diversas formas de sílica amorfa, silicatos e substâncias não silicosas como óxidos de Fe, Al e Mg, os quais apresentam a maior eficiência de adsorção de Si (MCKEAGUE e CLINE, 1963). O monômero H_4SiO_4 é o composto de silício (Si) presente na solução do solo em uma faixa de pH variando de 4 a 9 (MCKEAGUE e CLINE, 1963). Sua adsorção à superfície dos óxidos de Fe, avaliada por meio da forma radioativa deste elemento (Si^{31}) por HOLT e KING (1995), é do tipo específica. Assim sendo, pelo fato de P e Si competirem pelos mesmos sítios de adsorção, o primeiro pode deslocar o segundo e vice – versa da fase sólida para solução do solo (LEITE, 1997).

O objetivo deste estudo foi avaliar absorção de P pelo sorgo e seu crescimento, bem como a recuperação do P no solo por diferentes extratores químicos, em função do Si aplicado antecipadamente à fertilização com doses de P em um Latossolo Vermelho Distroférrico.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O sorgo

No Brasil a cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) desponta como produto agrícola de grande importância com potencial produtivo de grãos, forragens, álcool, amido industrial, farinha cerveja, cera etc, podendo ser cultivado nas áreas marginais da propriedade, sendo mecanizável do plantio à colheita, com grande amplitude da época de plantio nas (EMBRAPA, 1982). Nos últimos anos o sorgo ganhou destaque nas regiões onde períodos de estiagem ocorrem com frequência limitando a produção de grãos e forragem.

Na criação e produção agrícola de animais, o sorgo pode ser uma alternativa com papel fundamental na alimentação dos animais, promovendo estabilidade na produção de carne, leite e derivados, durante o período do ano onde a disponibilidade de forragem é reduzida (EMBRAPA 1997).

2.2 O fósforo (P)

O fósforo (P) é um dos nutrientes que merece mais atenção para produção agrícola nos solos da região de cerrados, visto sua capacidade, quando disponível a baixos teores, em limitar significativamente a produtividade das culturas. (SOUZA et al., 2002; SFREDO et al., 1996). Isto porque este elemento está envolvido na fotossíntese, formação de sementes e outras numerosas funções dentro das células. Segundo Blevins (1999), muito do metabolismo das células é controlado pela fosforilação e desfosforilação de certas proteínas (enzimas). O mesmo autor descreve outros mecanismos importantes os quais o P participa, sendo eles: constituinte da fita sésil do DNA, formador da molécula trifosfato de adenosina (ATP), principal fonte energética das células e constituinte do ácido fítico responsável pela atração e ligação de cátions na sua estrutura, atuando como armazenador destes elementos para formação da próxima geração de plantas.

2.2.1 Adsorção de fósforo (P) no solo

A posição do P como décimo segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre não o torna menos problemático nos solos tropicais, em consequência da sua habilidade em formar compostos de alta energia de ligação com os colóides do solo, conferindo-lhe alta estabilidade na fase sólida (FERNANDES et al., 2004).

A adsorção de ânions aos sítios de cargas elétricas localizadas nas superfícies dos colóides do solo foi inicialmente reportada por PARFITT (1978), utilizando-se de isothermas de adsorção ajustadas ao modelo de Langmuir, permitindo um estudo das interações entre ânions. TISDALE et al. (1984), sugeriram que essas cargas elétricas geram um déficit ou excesso de elétrons no sistema coloidal e são divididas em dois grupos: cargas superficiais constantes, originadas da substituição iônica isomórfica nas estruturas minerais, manifestando-se em qualquer valor de pH do solo, e cargas superficiais variáveis, originadas pela adsorção de íons na superfície dos colóides do solo. Outros íons como enxofre e silício também são atraídos pelas mesmas cargas que atraem o fósforo. Existem ainda, outros tipos de carga presentes nas superfícies dos minerais: carga protônica, carga difusa, cargas de complexos de esfera interna e externa. Segundo FONTES et al. (2001), as cargas de complexos de esfera interna, estão relacionadas com adsorção de fosfatos, sendo originadas da presença de íons, exceto H^+ e OH^- , que ligam-se diretamente à estrutura cristalina dos minerais - podendo explicar em alguns casos o processo de ligação específica do P com os minerais do solo.

Os modelos químicos ou de complexação de superfície desenvolvidos com minerais de óxidos de ferro puro e de interface reversível, tentaram descrever molecularmente o fenômeno de adsorção em condições de equilíbrio, podendo ser utilizados em solos com cargas elétrica variáveis (CASAGRANDE e CAMARGO, 1997). Estes pesquisadores descreveram alguns aspectos relacionados ao comportamento do P e sua adsorção em função da concentração e pH. O potencial eletrostático de superfície dos colóides influenciado pelo pH, quando positivo, favoreceu a adsorção de ânions, ocorrendo o inverso, quando negativo. A influência do pH no potencial eletrostático da superfície dos colóides trouxe, também, mudanças na concentração dos ânions fosfatados. A elevação do pH (pK próximo ao valor 7,2 representa o equilíbrio entre as espécies $H_2PO_4^-$ - HPO_4^{2-}) aumenta a concentração do íon divalente. Este efeito tenderá a elevar a adsorção em contraposição ao efeito da

elevação de pH sobre o potencial eletrostático de superfície. A elevação proporciona maior dissociação do H_3PO_4 e /ou da espécie H_2PO_4^- , elevando a concentração da espécie divalente (aumentando a adsorção). Porém, ultrapassando-se o valor de pK 7,2 ocorre aumento da forma PO_4^{3-} e o efeito da adsorção do P passa ser mais influenciado pelo pH, devido às alterações no potencial eletrostático de superfície. Constatou-se que a adsorção de fosfatos nos solos estudados foi mais influenciada pela concentração de fosfatos na solução de equilíbrio do que o pH.

Entre os mecanismos mais prováveis de adsorção de P às cargas do solo relacionado com a mineralogia, está a existência de duas ligações (específicas e covalentes) coordenadas com a superfície adsorvente, não permitindo a dessorção do P por lavagens a pH constantes (NOVAIS et al., 1990). A fonte geradora das cargas elétricas de superfícies do complexo coloidal dos solos formados pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, amorfos ou cristalinos, possuem caráter anfótero (TAN, 1993; MAGALHÃES & PAGE, 1984) A exemplo disto, FONTES (2001) cita em sua revisão, que os óxidos de ferro possuem o grupamento OH^- , onde ambos os elementos (H e O) dissociam-se facilmente. A goethita possui grande afinidade de ligação com íons de fosfato, por apresentar maior densidade de OH^- em algumas de suas faces, estabelecendo ligações de coordenação simples (Figura 1). Isto também pode ser observado na hematita, porém, em menor intensidade.

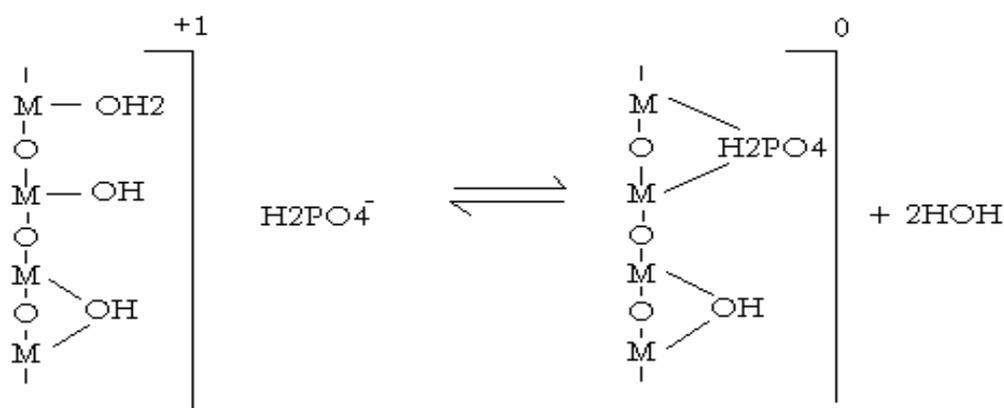


FIGURA 1. Exemplo de uma reação de adsorção do íon com o metal presente na estrutura do mineral. Nota-se que há remoção dos grupamentos hidroxílicos pelo íon, os quais estabelecem ligações de coordenação simples com os metais.
 FONTE: adaptado de TISDALE et al., (1984)

2.2.2 Extratores de fósforo (P) no solo

A confiabilidade dos extratores de P no solo e sua utilização baseia-se nas quantidades extraídas do elemento e sua correlação com a absorção pela planta, avaliando sua produção (STEFANUTTI et al., 1994). Atualmente a disponibilidade de P no solo é avaliada por diversos métodos constituídos de soluções diluídas ácidas, básicas e sais e misturas (BRASIL e MURAOKA, 1997). A exemplo, tem-se o extrator ácido Mehlich 1, bastante difundido nos laboratórios brasileiros de fertilidade do solo (SILVA et al. 1999), indicado para solos com baixos valores de capacidade de troca catiônica, com alto grau de intemperismo e cujo teor de fosfato de cálcio ligado a cálcio é baixo (THOMAS e PEASLEE, 1973). Diferentemente, atuando com uma faixa de pH próximo a 8,0, o extrator Olsen é recomendado para solubilização das formas de P ligado a cálcio (P-Ca), precipitando cálcio na forma de carbonato, mas não ataca o P ligado a Fe e a Al sob forma oclusa (BRAGA, 1980).

Extratores ácidos podem acarretar sérias dificuldades na interpretação dos resultados em virtude da dissolução de formas de P não disponíveis às plantas, visto a capacidade dos extratores em extrair formas preferenciais do elemento (BAHIA FILHO et al., 1983; BAHIA FILHO, 1982). Com isso, a aplicação de fosfatos naturais brasileiros nos solos e a utilização de extratores ácidos, por exemplo, podem superestimar os valores de P disponível, não havendo boas correlações para os teores desse elemento acumulado no tecido vegetal (SFREDO et al., 1979). O uso de extratores ácidos nas condições brasileiras tornaria-se restrito no futuro atentava RAIJ (1978), por duas razões principais, sendo elas: o uso freqüente de fosfatos naturais devido a dissolução da apatita e, que nos solos adubados, é de se esperar, que a reserva de P – lábil encontre-se em grande parte na forma de fosfato de alumínio dando-se, portanto, preferência aos extratores especializados em dissolver esta fração.

No trabalho de BRASIL e MURAOKA (1997) observou-se que o extrator Mehlich 3 apresentou boas correlações com a resposta das plantas e uma maior sensibilidade às variações do solo, mostrando-se adequado para prever a disponibilidade de P às plantas para as diferentes condições de solo e fontes fosfatadas. Isto porque O ácido acético presente no extrator permite uma solubilização mais moderada em relação aos ácidos minerais presentes em outros extratores. O extrator Mehlich 1 promoveu a remoção do P do solo sem a devida correspondência com a resposta biológica das plantas. Seus resultados também mostram que havendo um maior

tempo de contato entre o fertilizante e o solo, a eficiência dos extratores é potencializada no que diz respeito à correlação com as quantidades absorvidas pela planta.

No trabalho de RAIJ (1983) o P extraído entre os extratores testados relacionou-se estreitamente com a absorção deste nutriente para a cultura do e com a produção de matéria seca milho (dentre eles o Mehlich 1), não havendo diferença entre os extratores embora, RAIJ (1978), relatar que o extrator Mehlich 1 seria o menos indicado para análise de P em solos argilosos, sendo a resina trocadora de ânions outro extrator apresentando resultados mais satisfatórios. Esta resina fundamenta-se na premissa de simular o comportamento do sistema radicular na absorção de P. Além disto, esta resina não promove alterações nas condições químicas naturais dos solos.

Em plantas de arroz, BELTRÁN et al.(1998), observaram dentre os extratores testados, que o Mehlich 1 apresentou maior capacidade em extrair P das amostras de solo, além de constatarem que as fontes de fósforo utilizadas comportaram-se de forma diferente em relação aos extratores.

2.3 O silício (Si)

O silício é o segundo elemento mais abundante presente na crosta terrestre (26%), ocorrendo praticamente em todas as rochas, argilas e terras, na forma de silicatos complexos de alumínio, ferro, magnésio e outros metais (SIENKO e PLANE, 1974). Não tem sido estudado na agricultura brasileira tão intensivamente como outros nutrientes principalmente, por ser considerado, elemento não essencial a maioria das culturas (BARBOSA FILHO et al., 2000).

Largo interesse existe entre técnicos e agricultores pelo Si devido sua capacidade de respostas positivas quanto aos aspectos fundamentais que envolvem custos e lucratividade na atividade agrícola. Quando aplicado às culturas, seus benefícios dão-se sobre: aumentos nas produtividades das áreas e na resistência a estresses bióticos e abióticos (LIMA FILHO, 1999), como por exemplo: resistência à pragas e doenças, redução do alumínio tóxico às plantas, redução da transpiração excessiva e etc.

Segundo FARIA (2000), nos solos de cerrados, devido ao baixo valor de pH, o ácido monossilícico (H_4SiO_4) é a principal espécie de silicato na solução do solo, e pela qual a planta o absorve, diminuindo sua concentração com a elevação do pH. Esta

elevação do pH proporciona a ionização do ácido monossilícico, tornando-o carregado negativamente e aumentando sua suscetibilidade à adsorção no solo.

A quantidade considerável de Si na crosta terrestre e na maioria dos solos devido aos consecutivos cultivos pode reduzir os níveis deste elemento no solo até um ponto em que sua reposição por meio da adubação seja necessária (KORNDÖRFER e DATNOFF, 1995). Ainda, nos solos de regiões tropicais e subtropicais, o processo de dessilicatização relacionado ao intemperismo e a lixiviação intensa de Si podem atuar como redutor da sua concentração nos solos (LIMA FILHO et al., 1999). A quantidade máxima de Si a ser aplicada no solo, ainda não está definida. Tudo indica que quanto mais do elemento a planta absorver, maiores serão seus benefícios pois, ainda não se constatou seu efeito tóxico aos vegetais (KORNDÖRFER et al., 2002). Para definição destas doses, é preciso antes, determinar-se uma metodologia confiável a qual possa expressar exatamente os teores de Si nas fontes utilizadas, o que é dificultada pela falta de metodologias confiáveis para determinação da concentração e disponibilidade de Si nas várias fontes aplicadas (PEREIRA et al. 2003).

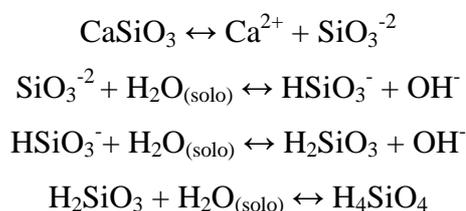
Várias são as fontes contendo elevadas concentrações de Si e que são adicionadas aos solos visando aumento de produtividade nas áreas agrícolas (Quadro 1). Estas fontes podem ser escórias ou subprodutos dos processos industriais apresentando grande variação na solubilização, composição e disponibilidade de Si (BARBOSA FILHO e PRABHU, 2000)

QUADRO 1. Teor total de SiO₂, CaO, MgO e poder de neutralização (PN) de algumas fontes silicatadas.

Materiais e escórias	Origem	SiO ₂		CaO	MgO	PRNT.CaCO ₃
		Total	% solúvel*	-----%	-----	
Wollastonita	Vansil	51,9	30,1	42,4	0,2	76,4
Alto-forno	Mannesman	38,4	6,7	30,1	7,5	72,6
Forno LD	Mannesman	12,3	33,1	40,9	7,3	91,3
Escória de P	Rhodia	46,1	39	43,5	0,7	79,6
MB-4	Mibasa	18	1,8	2,2	19,1	51,5
Alto-forno	CSN	33,4	5,1	42,5	5,2	89,1
Forno LD	CSN	10,9	4,5	28,2	7,6	69,3
Forno LD	Belgo	17,4	27,1	39,5	9,6	94,4
Forn. Elétr.	Siderme	15,8	40,7	25,7	12,6	77,2
Aço inox	Recmix	23,2	43,4	41	11	100,7
Forno LD	Açominas	11,2	21	27,6	2,9	56,5

FONTE: adaptado de KORNDÖRFER *et al.* (2002)

Outra importante propriedade dos materiais residuais de siderurgia contendo Si, é a possibilidade de seu uso como corretivo da acidez do solo (FARIA, 2000), por meio da reação de solubilização abaixo.



Os silicatos de metais alcalinos quando hidrolisados promovem reações alcalinas, elevando o pH e, portanto, reduzem sua solubilidade em meio alcalino, amenos que se forneça ao meio uma fonte de prótons.

2.4 Competição de silício (Si) e fósforo (P) pelos sítios adsorptivos no solo

Segundo SCHUNKE e MACEDO (2002), no Brasil é necessário estabelecerem critérios para recomendação das adubações fosfatadas aplicadas às diferentes culturas, como por exemplo os níveis críticos de P nos solos e o conhecimento sobre as relações existentes entre os fatores que regulam o processo de liberação do P – lábil; em especial a quantidade e tipo de mineral de argila presente nos solos. Todavia, a impossibilidade de alterar certas propriedades dos solos que exercem influência direta sobre o fenômeno de adsorção de P levam pesquisadores e agricultores a adotarem alternativas para se manejar tal problema.

As avaliações realizadas no solo e na planta para explicar a competição por sítios de adsorção entre elementos químicos baseiam-se nas possíveis correlações existentes entre o teor de determinado elemento no solo, quantificado por algum extrator, e o teor do mesmo elemento no tecido vegetal. Outras variáveis relacionadas à produção vegetal e a cultura como massa seca e fresca da parte aérea e das raízes, altura de plantas, produção relativa, diâmetro do colmo entre outras, também auxiliam na compreensão dessa competição.

No trabalho de CARVALHO et al. (2000), foi possível observar que a aplicação de Si posterior à adubação fosfatada possibilitou a dessorção do P no solo. Isto foi quantificado de forma indireta por meio da determinação do ganho de massa seca em função da disponibilidade de P no solo e sua correlação com os valores foliares. Esta ação do Si deu-se menos evidente nos solos estudado mais intemperizado, contendo maior teor de argila (Latosolo).

LEITE (1997) observou em amostras de Latossolo Vermelho Distroférrico que a pré-aplicação de Si seguida da aplicação de P revelaram resultados condizentes com a hipótese de que a ordem de aplicação fez com que o Si ocupasse primeiramente os sítios de adsorção, resultando na diminuição da capacidade de adsorção do P no solo. No entanto, de maneira acentuada, houve aumento nos teores de P com a crescente adição de Si e P implicando, que tão importante quanto a ordem de aplicação dos elementos, são suas concentrações na solução do solo. Para o Si na solução do solo, observou-se que a concentração do elemento aumentou com acréscimos cada vez menores, em função das aplicações de Si e P.

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O experimento foi realizado em casa de vegetação no núcleo de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, com material de um Latossolo Vermelho distroférico argiloso (representativo de Mato Grosso do Sul). A região onde o experimento foi conduzido tem como coordenadas geográficas: latitude 22°14'S, longitude 54°49'W, altitude de 458 m e clima Cfa (mesotérmico úmido sem estiagem). A precipitação pluviométrica total da região é de 1200 a 1400 mm, já a evapotranspiração real anual é de 1100 a 1200 mm, e a temperatura média anual é de 22°C. A variação mesoclimática é de úmido a sub úmido, com excedente hídrico anual de 800 a 1200 mm durante quatro meses.

3.2 Análises estatísticas

O delineamento de tratamento utilizado foi um fatorial completo (5 x 5) formado pela combinação de cinco doses de Si e cinco de P, dispostos no delineamento experimental em blocos casualizados com quatro repetições, totalizando 100 parcelas.

Primeiramente, para cada característica avaliada, foram obtidas as análises de variância (ANAVA) experimentais (PIMENTEL GOMES, 1985). Havendo significância dos valores de F das ANAVA's experimentais para os fatores P e/ou Si ou interação Si x P, obtiveram-se as ANAVA's para regressões. Sendo os valores de F das ANAVA's de regressões também significativos, ajustaram-se equações de regressões para o conjunto das observações quando o efeito foi significativo para Si e/ou P, e superfícies de resposta, quando o efeito foi significativo para interação Si x P. O número de parâmetros estimados presentes nas equações encontradas dependeu das suas significâncias testada pelo teste de t

(ALVAREZ V, 1985). A análise de correlação linear (Pearson) entre as características avaliadas também foi realizada.

Nas plantas foram avaliadas as características: estatura da parte aérea (ESPL), diâmetro do colmo (DICO), massa seca da parte aérea (MSPA) e conteúdos de P e Si na MSPA (PPA e SIPA respectivamente).

No solo foram avaliados os conteúdos de P pelos extratores Mehlich 1 (PME1), Mehlich 3 (PME3) e Olsen (POLSEN), Si extraído por cloreto de cálcio (SISC) e pH, após o cultivo com o sorgo. Nas amostras onde foram apenas aplicadas as doses de Si foi determinado o fósforo remanescente.

3.3 Coleta, caracterização e tratamento da amostra de solo

O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Distroférico coletado na profundidade de 0 – 30 cm em uma área de pousio recoberta por vegetação predominantemente composta por *Brachiaria decumbens* cujos resultados das análises química e física de acordo com EMBRAPA (1997), são os seguintes, em $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$: 1,6 (K), 11,9 (Al), 17,9 (Ca), 7,7 (Mg), 89 (H+Al), 27,2 (SB) e 116,2 (T); em mg dm^{-3} : 22,8 (M.O.) e 1 (P); pH em H_2O : 5,1; pH em CaCl_2 : 4,0; em g kg^{-1} : (168) SiO_2 , (0,5) P_2O_5 , (34,3) TiO_2 , (327,6) Fe_2O_5 , (165,3) Al_2O_5 , 760 (argila), 90,9 (silte), 89,2 (areia grossa), 60,2 (areia fina), em g cm^{-3} : 1,22 (densidade do solo) e 2,08 (densidade de partículas); em $\text{cm}^3 \text{dm}^{-3}$: 416 (volume total de poros).

Para obtenção da densidade da amostra de solo ($1,22 \text{ g cm}^{-3}$) pesou-se em recipiente de volume e peso conhecido terra fina seca ao ar previamente passada em peneira de 2 mm de abertura. Conhecido o peso da amostra de solo, dividiu-se o valor encontrado pelo volume do recipiente, obtendo-se o valor de densidade da amostra de solo. A densidade de partículas foi determinada por meio do método do balão volumétrico (EMBRAPA, 1997). Com os valores de densidade da amostra e partícula calculou-se o volume total utilizado para cálculo do controle de umidade nos vasos.

Após caracterização a amostra de solo coletada foi seca ao ar, moída em recipientes plásticos, passada em peneira com abertura de 2 mm e homogeneizada sobre lona de polietileno para sua uniformização. A correção da acidez foi realizada a partir dos resultados da curva de incubação do corretivo realizadas em copinhos plásticos de 250 mL por um período de 21 dias, com doses crescentes de uma mistura de carbonato

de cálcio (CaCO_3) p.a. e de magnésio (MgCO_3) $_4$ Mg(OH)_2 5 H_2O p.a. na relação entre Ca e Mg de 4:1. A dosagem desse material para correção da acidez foi aplicada em sacos plásticos contendo 2000 g de solo, mantendo o teor de umidade com água destilada em 60% do volume total de poros (41,35%). Após a aplicação da água destilada os sacos plásticos foram fechados, deixando apenas um orifício para possibilitar trocas gasosas com o meio por meio de um cano de PVC (10 cm de comprimento e $\frac{1}{2}$ de diâmetro) durante o período de incubação.

3.4 Aplicação do silício (Si) no solo

Decorrido o período de incubação do corretivo os solos de cada saco plástico foram secos ao ar, passados em peneira com abertura de 2mm e homogeneizado. Posteriormente subamostras de 1900 g de solo ($1,557 \text{ dm}^{-3}$) foram incubadas durante 21 dias com cinco doses de Si (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm^{-3}) seguindo o mesmo procedimento quanto a correção de umidade e fechamento dos sacos plásticos descrito no processo de incubação do corretivo de acidez, tendo como fonte o metassilicato de sódio pentahidratado ($\text{Na}_2\text{Si}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$) p.a.. As doses foram veiculadas e aplicadas utilizando-se 50 mL de água destilada por saco plástico contendo solo. O solo foi espalhado sob uma superfície plástica, onde recebiam a dose de silício com auxílio de pipeta volumétrica aferida. Posteriormente, o solo era transferido para outro saco plástico resistente, homogeneizado manualmente e, por fim, recolocado no saco plásticos de origem. Antes da aplicação das doses de Si foi determinado o fósforo remanescente na amostra de solo para determinação a amplitude entre as cinco doses de P a serem usadas no experimento segundo ALVAREZ V. et al. (1990) e ALVAREZ V. et al. (2000).

3.5 Aplicação do fósforo (P) e demais nutrientes no solo

Decorrido o período de incubação do metassilicato, os solos contidos nos sacos plásticos foram secos ao ar, passado através de peneira com abertura de 2 mm de abertura e homogeneizado. Subamostras de 1830 g de solo ($1,500 \text{ dm}^{-3}$) foram transferidas para sacos plásticos onde receberam as cinco doses de P (0, 140, 280, 420 e 560 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) estimadas a partir do P remanescente ($4,2 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$). A forma de veicular e aplicar o P procedeu como descrita para o Si, tendo como fontes: fosfato de

sódio (NaH_2PO_4), fosfato de potássio (KH_2PO_4) e fosfato de amônio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$). A recomendação de adubação para N (150), K (75), S (90), B (0,5), Cu (1,5), Zn (5,0), Mo (0,1), Fe (1,55) e Mn (1,22) em mg dm^{-3} foi aquela utilizada para experimentos em casa de vegetação de acordo com Novais et al. (1991). As fontes empregadas foram: nitrato de amônio (NH_4NO_3), sulfato de potássio (K_2SO_4), sulfato de sódio (Na_2SO_4), ácido bórico (H_3BO_4), sulfato de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), sulfato de zinco ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), molibdato de sódio ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e cloreto de manganês ($\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) respectivamente. O ácido cítrico atuando como estabilizante das soluções foi aplicado na relação $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ de solução estoque.

3.6 Plantio e manejo da cultura nos vasos sob casa de vegetação

Em cada vaso contendo 1700 g de solo contendo as doses de Si e P semearam-se 12 sementes de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivar BR – 304, igualmente espaçadas em uma profundidade de 3 cm. No desbaste deixaram-se 6 plantas por vaso, realizado duas semanas após a semeadura. Aos 12 e aos 23 dias após a semeadura, foram efetuadas adubações de cobertura com os seguintes nutrientes, nas respectivas dosagens em mg dm^{-3} : N (25) e K (25).

O controle da umidade nos vasos durante o período experimental. Foi realizado por meio de pesagem dos vasos a cada dois dias, repondo a quantidade de água necessária para ocupar o volume total dos poros em 60%. Durante a pesagem, no momento de recolocar os vasos na bancada, foi realizado o rodízio dos vasos dentro de cada bloco (repetição).

Como as gramíneas em geral, a absorção do Si pelo sorgo é ativa. Isto, além de outras vantagens, como: crescimento rápido e amplo sistema radicular justificam a utilização do sorgo como planta teste (GALVEZ et al., 1987 citado por LEITE, 1997).

3.7 Análise do fósforo (P) no solo

Os métodos utilizados para determinação de P no solo Mehlich 1, Mehlich 3 e Olsen de acordo com EMBRAPA, (1997); Mehlich, (1984); Olsen & Sommers, (1982) respectivamente. A concentração do P nos extratos de solo obtidos foi realizada por meio de leituras em espectrofotômetro (BRAGA e DEFELIPO, 1974) utilizando-se um comprimento de onda de 660 nm.

3.8 Determinação do silício (Si) no solo

O Si no solo foi extraído por CaCl_2 segundo RAIJ & CAMARGO (1973), seguindo a metodologia de análise descrita em LEITE (1997), onde o autor argumenta que “a determinação colorimétrica do o elemento Si é possibilitada pela formação e estabilização de um complexo sílico – molíbdoso de cor azul. A interferência do P é evitada pelo acréscimo de ácido tartárico”.

Em copos plásticos de 80mL com tampa rosqueável foram adicionados 2,5 cm^3 de terra fina seca ao ar contendo as doses combinadas de Si e P e 25 mL de CaCl_2 2,5 mmol.L^{-1} . O esse conteúdo foi agitados em mesa horizontal a 170 rpm durante 10 minutos seguido de repouso durante 16 horas para separação do líquido sobrenadante (extrato). Os extratos obtidos eram acondicionados em recipientes plásticos para posterior determinação do Si por espectrocolorimetria.

A quantificação do Si foi realizada pipetando-se o extrato de solo para tubo de ensaio plástico graduado com tampa rosqueável (50 mL), seguidos da adição da solução “725”, ácido tartárico 30% e ácido ascórbico 0,4% na quantia de 1 mL para todos os componentes. Por fim, adicionou-se 6 mL de água destilada agitando-se os tubos em agitador próprio durante 10 segundos. Após agitação a solução do tubo permaneceu em descanso durante 30 minuto, permitindo a completa formação da coloração azulada. As leituras das soluções nos tubos pelo espectrofotômetro procede-se em comprimento de onda de 660 nm)

3.8.1 Preparo das soluções para determinação colorimétrica do silício (Si)

- Solução padrão a 20 mg L^{-1} de Si: transferiu-se 2 mL da solução contendo 1000 mg.L^{-1} de Si para um balão volumétrico de 100 mL, completando seu volume com água destilada. Esta solução foi acondicionada em recipiente plástico e acondicionada em geladeira.
- Solução sulfomolíbdica: foi preparada dissolvendo 37 g de molibdato de amônio p.a $[(\text{NH}_4)_6 \text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}]$ em 150 ml de água destilada transferindo esta solução para balão volumétrico de 250 ml, adicionando-se com o auxílio de pipetador, vagarosamente, 25 ml de H_2SO_4 concentrado p.a. Por fim, completou-se o volume

do balão com água destilada, transferindo imediatamente esta solução para recipiente plástico com tampa.

- Demais soluções: foi necessário o preparo de duas outras soluções para determinação do Si no solo, sendo elas: solução de ácido tartárico a 30% e ácido ascórbico a 0,4%, ambas preparadas através da dissolução dos reagentes p. a. em água destilada.

3.8.2 Calibração do espectrofotômetro –determinação silício (Si)

O espectrofotômetro foi calibrado mediante a curva padrão formada por soluções contendo concentrações conhecidas de Si. Isto é possível, transferindo-se para tubos iguais àqueles utilizados para determinação de Si nas amostras de solo, volumes dos reagentes que constam no Quadro 2. Os tubos foram agitados em agitador próprio, e as leituras realizadas após um período de 30 minutos para o desenvolvimento da cor azulada, prosseguindo as leituras em espectrofotômetro em comprimento de ondas de 660 nm.

QUADRO 2. Curva de calibração com soluções padrão para espectrofotômetro na análise do silício (Si) extraído pelo CaCl_2 2,5 mmol L^{-1} .

Nº tubo	Conc. Si (mg . L ⁻¹)	Solução 20 mg . L ⁻¹ Si (mL)	CaCl ₂ 2,5 mmol . L ⁻¹ (mL)	H ₂ O (mL)	Sulfomolibdica (mL)	Acido tartárico (mL)	Acido ascórbico (mL)
1	0,0	0,0	1,0	6,0	1,0	1,0	1,0
2	0,2	0,1	1,0	5,9	1,0	1,0	1,0
3	0,4	0,2	1,0	5,8	1,0	1,0	1,0
4	0,6	0,3	1,0	5,7	1,0	1,0	1,0
5	0,8	0,4	1,0	5,6	1,0	1,0	1,0
6	1,0	0,5	1,0	5,5	1,0	1,0	1,0

3.9 Análise química do tecido vegetal

Após 35 dias da semeadura do sorgo nos vasos, as biomassas das partes aéreas das plantas foram colhidas, lavadas em água destilada, secas ao ar e em estufa com circulação forçada de ar (65°C) durante 72 horas e, trituradas em moinho de Willey.

Para determinação da concentração do P nos tecidos das plantas, submeteu-se as massas secas coletadas à digestão nítrico-perclórica e, posteriormente, a quantificação por espectrocolorimetria em comprimento de onda de 465 nm (MALAVOLTA et al., 1997). A coloração desenvolvida nas amostras e que possibilitaram a leitura pelo espectrofotômetro foi o amarelo (coloração originada do composto formado pelo sistema vanadomolibdofosfato).

O Si foi determinado pela combustão de 0,2 g de massa seca em mufla à temperatura de 600°C por 30 minutos, utilizando-se cadinhos de aço inox, seguido de solubilização das cinzas em tubos plásticos graduados de 50mL com tampa rosqueável, adicionando-se 2,5 mL de NaOH 2,5 mol L⁻¹.

Para leitura em espectrofotômetro no comprimento de onda de 660 nm da concentração do Si no extrato vegetal, foram transferido para tubos plásticos iguais àqueles utilizados no processo de solubilização das cinzas, 1 mL do extrato vegetal, 3 mL de água destilada, 1 gota de para-nitrofenol, 2 gotas de H₂SO₄ a 25 %, 1 mL da solução sulfomolibdica, 1 mL da solução de ácido tartárico e 1 mL da solução de ácido ascórbico, completando-se o volume do tubo com água destilada.

O preparo das soluções sulfomolibdica bem como as de ácido ascórbico e tartárico estão descritas no tópico referente ao preparo de soluções utilizadas para determinação do si no solo extraído por CaCl₂.

A formação da curva padrão para calibração do espectrofotômetro formada por soluções contendo concentrações conhecidas de Si pode ser visualizada no Quadro 3.

QUADRO 3. Curva de calibração com soluções padrão para espectrofotômetro na análise do silício (Si) na massa seca da parte aérea.

N ^o tub	Conc. Si (mg . L ⁻¹)	Sol. 20 mg L ⁻¹ Si (mL)	NaOH 2,5 mmol L ⁻¹ (mL)	H ₂ O (mL)	Sol. sulfomolib. (mL)	Sol. ac. tart. (mL)	Sol. ac. asc. (mL)
1	0,0	0,0	1,0	6,0	1,0	1,0	1,0
2	0,2	0,1	1,0	5,9	1,0	1,0	1,0
3	0,4	0,2	1,0	5,8	1,0	1,0	1,0
4	0,6	0,3	1,0	5,7	1,0	1,0	1,0
5	0,8	0,4	1,0	5,6	1,0	1,0	1,0
6	1,0	0,5	1,0	5,5	1,0	1,0	1,0

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relação entre características do solo e de plantas do sorgo

Os coeficientes de correlação simples entre as características do solo e dos componentes de produção do sorgo estão apresentados no Quadro 4.

QUADRO 4. Coeficientes de correlação linear simples entre características do solo e planta.

Características	Codificação	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Massa seca parte aérea	1	---								
Diâmetro de caule	2	0,96**	---							
Altura de plantas	3	0,95**	0,87**	---						
Si na parte aérea	4	0,69**	0,75**	0,56**	---					
P na parte aérea	5	0,70**	0,83**	0,53**	0,76**	---				
Si solúvel em CaCl ₂	6	0,12 ^{ns}	0,24 ^{ns}	Ns ⁽¹⁾	0,38*	0,55**	---			
pH do solo	7	0,56**	0,66**	0,40*	0,61**	0,81**	0,80**	---		
P extraído p. Mehlich-1	8	0,50**	0,70**	0,31 ^{ns}	0,70**	0,89**	0,40*	0,63**	---	
P extraído p.Mehlich-3	9	0,46**	0,67**	0,26 ^{ns}	0,70**	0,88**	0,45*	0,66**	0,99**	---
P extraído pelo Olsen	10	0,56**	0,74**	0,36*	0,73**	0,94**	0,51**	0,74**	0,98**	0,98**

* e **: Significativo a 5 e a 1% de probabilidade pelo teste t. ns = não significativo.

4.2 Avaliação das características da planta de sorgo

Os valores médios de produção de massa seca da parte aérea (MSPA), diâmetro de colmo (DICO), estatura de plantas (ESPL) e Si e P acumulados na parte aérea do sorgo (SIPA e PPA respectivamente), são mostrados no Quadro 5.

QUADRO 5. Valores médios para as características das plantas de sorgo avaliadas em função da aplicação de silício (Si) e fósforo (P) no solo.

Si (mg dm ⁻³)	P adicionado (mg dm ³)				
	0	140	280	420	560
Massa seca da parte aérea (g vaso⁻¹)					
0	0,68	3,43	3,57	2,93	3,15
100	0,75	3,07	3,80	3,21	3,22
200	0,70	2,96	3,55	3,67	3,22
300	0,70	3,19	3,39	3,40	2,76
400	0,72	2,76	3,06	3,49	2,69
Diâmetro de colmo (mm)					
0	1,98	3,30	3,65	3,54	3,83
100	1,98	3,13	3,65	3,58	3,63
200	1,95	3,20	3,58	3,80	3,65
300	2,03	3,33	3,40	3,61	3,44
400	1,98	3,10	3,40	3,73	3,53
Estatura de plantas (cm)					
0	40,83	76,05	70,08	62,73	62,38
100	42,55	71,43	68,43	64,08	65,33
200	40,80	67,30	70,38	67,63	62,90
300	41,48	69,88	67,00	64,63	59,85
400	40,65	65,93	65,95	63,65	59,05
Si na parte aérea (mg vaso⁻¹)					
0	2,00	23,10	29,54	38,84	35,67
100	2,57	31,71	36,08	15,52	33,53
200	2,23	25,00	19,47	67,83	65,41
300	2,69	13,46	40,24	45,83	54,53
400	7,30	16,58	35,59	28,59	27,05
P na parte aérea (mg vaso⁻¹)					
0	1,55	21,23	27,64	35,17	45,26
100	2,07	20,98	27,13	34,52	49,83
200	1,79	18,03	24,93	42,87	48,99
300	1,80	19,01	30,60	50,89	55,60
400	2,03	19,44	34,96	58,74	

As características da planta de sorgo MSPA, DICO e ESPL foram significativas influenciadas somente pelas doses de P, enquanto que, para PPA, os efeitos foram significativos para doses de Si e P. Para SIPA, tais efeitos o foram significativos para doses de Si, P e para interação de doses de Si x P (Quadros 6).

QUADRO 6. Quadrados médios da análise de variância da produção de matéria seca da parte aérea, estatura de plantas, diâmetro de colmo, silício (Si) e fósforo (P) na parte aérea, em função da aplicação de Si e P no solo.

Fontes de Variação	G.L.	Massa seca parte aérea	Estatura de Plantas	Diâmetro de colmo	Si parte aérea	P parte aérea
Bloco	3	0,6264 ns	33,8284 ns	0,1209 ns	121,8482 ns	0,4071 ns
Si	4	0,2557 ns	41,2293 ns	0,0393 ns	607,4465 **	0,9514 **
P	4	26,0112 **	2700,39 **	9,7797 **	5107,686 **	23,5100 **
Si x P	16	0,2218 ns	19,3949 ns	0,0510 ns	612,2474 **	0,2821 ns
Resíduo	72	0,33212	18,89267	0,09463	86,14263	0,20467
C.V. (%)		21,18	7,10	9,63	33,13	26,43

*, **: Significativo ao nível de 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F e ns: não significativo.

O baixo grau de intemperismo do solo e a predominância da caulinita na fração foram, provavelmente, os fatores determinantes para a baixa resposta do sorgo à aplicação de Si, podendo estar a concentração desse elemento em níveis satisfatórios para a planta, embora tenha sido observada elevada adsorção ou precipitação desse elemento no solo, em decorrência da aplicação do metassilicato de sódio.

A máxima produção de MSPA obtida em função da aplicação de P no solo foi de 3,41 g vaso⁻¹, alcançada com a dose estimada de 298,94 mg dm⁻³ de P (Figura 2). LEITE (1997), estudando a interação de Si e P, também constatou apenas efeito das doses de P aplicadas ao solo sobre a produção de massa seca da parte aérea de sorgo cultivado em casa-de-vegetação num Latossolo Vermelho Aluminoférrico bem intemperizado e com predominância de gibbsita na fração argila.

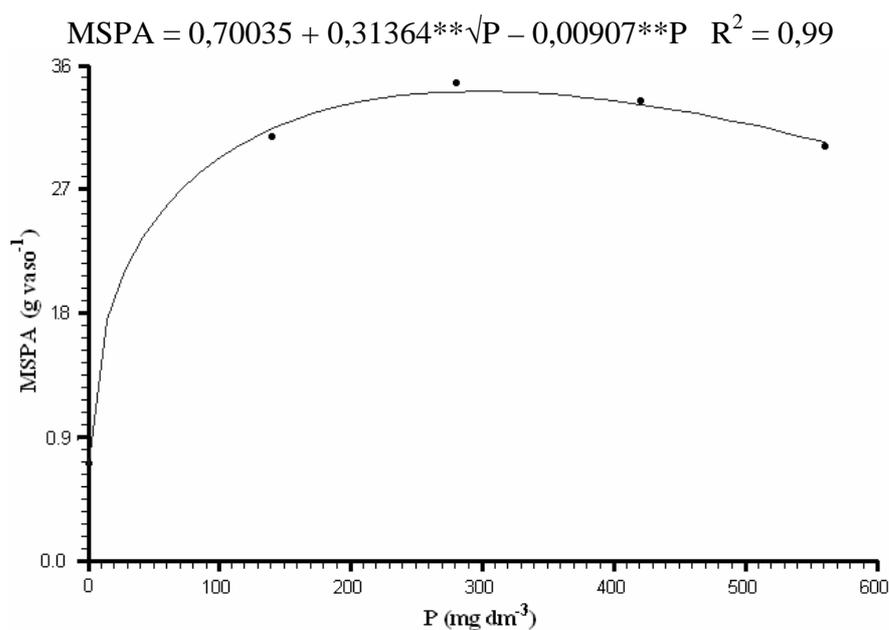


FIGURA 2. Massa seca da parte aérea (MSPA) do sorgo em função da aplicação de fósforo (P).
** Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

O diâmetro de colmo (DICO) como variável dependente de doses de P (Figura 3) tem o valor de 3,65 mm como máxima espessura estimada por modelo matemático, em função da aplicação de 539,1 mg dm⁻³ de P.

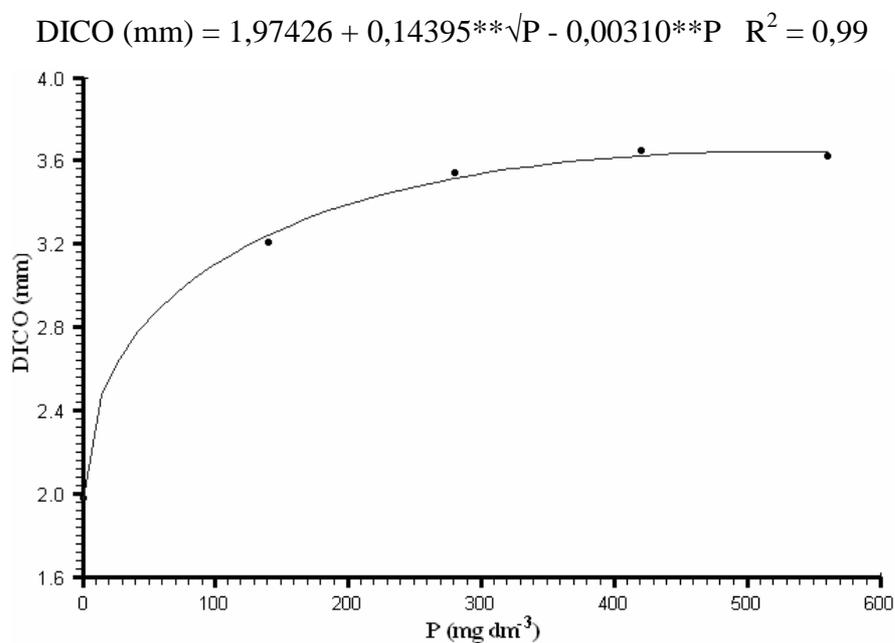


FIGURA 3. Diâmetro de colmo (DICO) do sorgo em função da aplicação de fósforo (P).
** Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

A estimativa da máxima ESPL (69,8 cm) ocorreu com aplicação de 226,9 mg dm⁻³ de P. Este valor da aplicação de P foi 24,1% inferior aquele responsável pela máxima produção de MSPA.

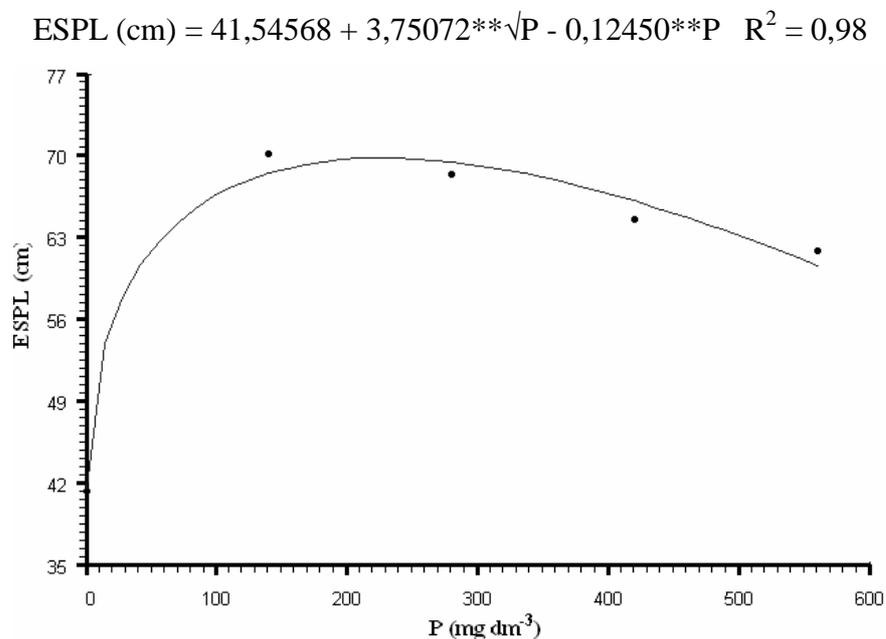


FIGURA 4. Estatura da planta (ESPL) de sorgo em função da aplicação de fósforo (P).

** Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

Analisando a dose de P (298,94 mg dm⁻³) para a máxima produção de MSPA relativamente àquelas estimadas para a obtenção de valores máximos de DICO e ESPL, percebe-se que o valor esperado de DICO é de 1,56 mm, o qual é 57% menor do que aquele estimado para a aplicação de 539,1 mg dm⁻³ de P e se aproxima do esperado em condições de cultivo geralmente em ambientes naturais, onde os níveis de P não são elevados. Todavia, quando este raciocínio é feito para ESPL, nota-se que o valor estimado para esta característica é de 69,2 mm, portanto 0,8% menor do que aquele esperado, quando da aplicação da dose responsável pela altura máxima, o que o revela o um menor efeito do aumento (em 31,7%) daquela dose de P sobre a ESPL.

O P acumulado na massa seca da parte aérea do sorgo (PPA) foi apenas significativamente afetado pelo Si e P aplicados no solo (Quadro 5).

Na presença de Si, para a elevação de cada unidade de PPA há necessidade da aplicação de 10,30 mg dm⁻³ de P ao solo (Figura 5), sendo que na máxima dose de P aplicado o valor de PPA foi de 54,38 mg dm⁻³. Utilizando-se a dose estimada de 298,94 mg dm⁻³ de P, responsável pela máxima produção de massa seca da parte aérea, estimou-se um acúmulo de 31,07 mg vaso⁻¹ de P.

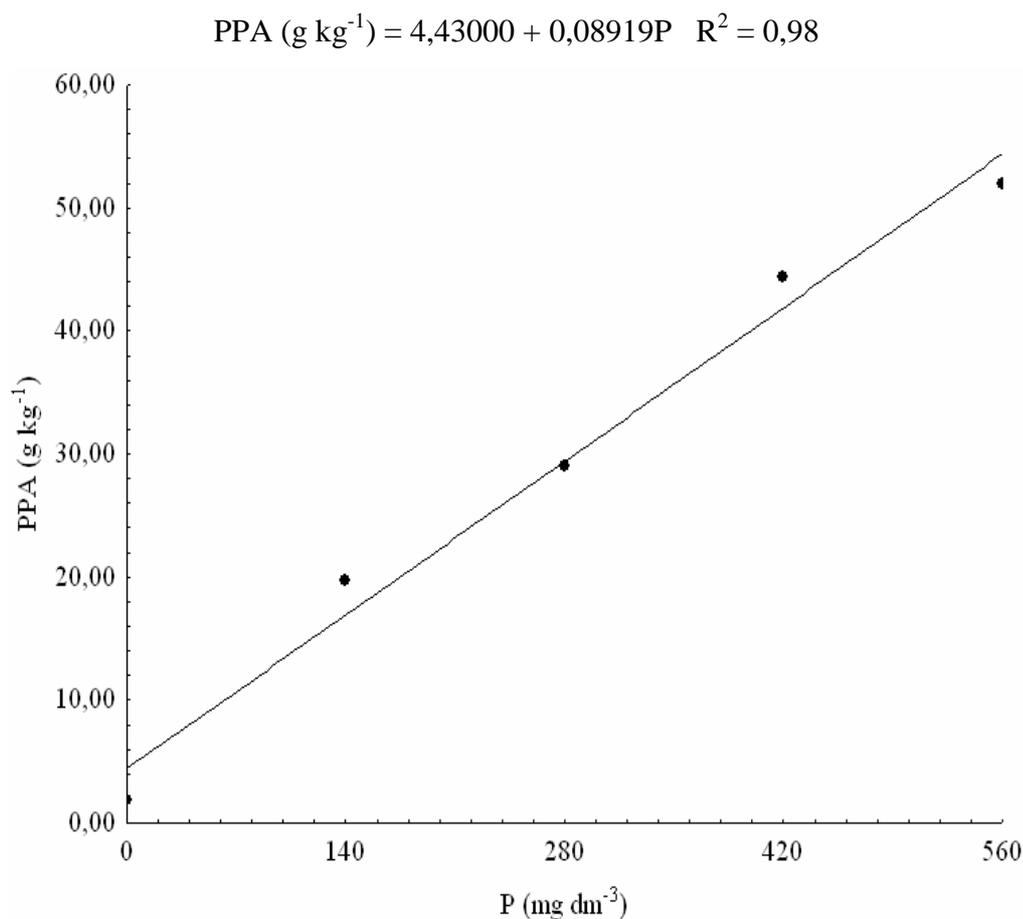


FIGURA 5. P acumulado na parte aérea (PPA) em função de fósforo (P) aplicado.

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Na presença de P, para a elevação de cada unidade de PPA há necessidade da aplicação de 11,80 mg dm⁻³ de Si ao solo (Figura 6). O valor de PPA obtido na máxima dose de Si aplicado foi de 33,88 mg dm⁻³. Na equação de regressão da Figura 6, espera-se que, com 140 mg dm⁻³ de Si no solo (correspondente à aplicação de 2000 kg de uma fonte solúvel com 30% de SiO₂), um aumento do PPA na ordem de 12,58% (3,13 mg dm⁻³ de P), comparado com a não aplicação de Si.

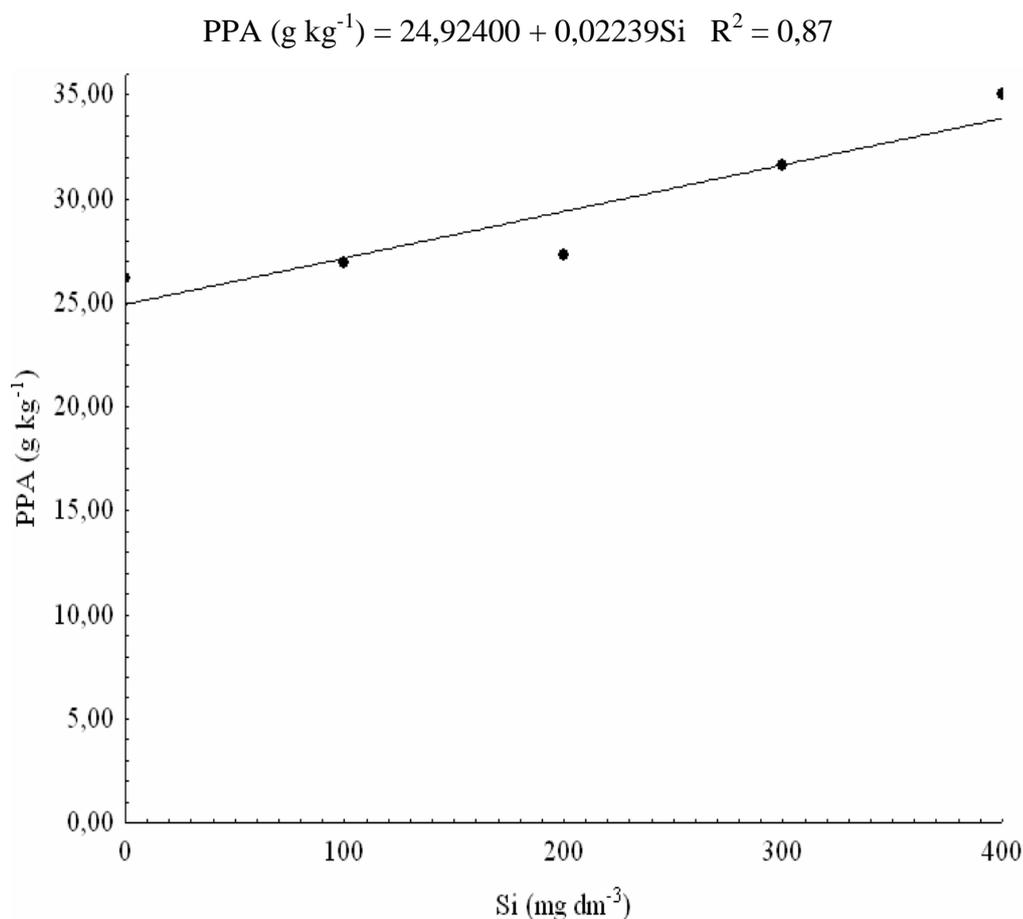


FIGURA 6. P acumulado na parte aérea (PPA) em função de silício (Si) aplicado.

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Observa-se com a pós-aplicação do P na presença de Si a ocorrência de um aumento mais expressivo nos valores de PPA em relação à pré-aplicação de Si na presença de P. Isso pode estar relacionado com a alta capacidade do solo em adsorver P, sendo a pré-aplicação de Si pouco eficiente no processo de ocupação de sítios de cargas adsorptivas e disponibilização de P à planta. LEITE (1997) constatou que na mais alta dose de Si aplicada (400 mg dm⁻³ de Si) não houve efeito sobre o acúmulo de P no tecido, embora tendo trabalhado com um solo mais intemperizado ($K_i = 0,49$) e com alta taxa de adsorção de P (Latosolo Vermelho Aluminoférrico). No presente estudo, o solo é menos intemperizado ($K_i = 1,70$) e com taxa de dessorção de P elevada (KER, 1995), sendo a caulinita o filossilicato predominante na fração argila, conforme mencionado. ROY et al. (1971) estudando a aplicação de CaSiO_3 em solos ácidos do Havaí cultivados com cana-de-açúcar, constataram que o maior percentual de diminuição da adsorção de P ocorreu em solos com maiores teores de caulinita e o

menor, em solos mais intemperizado, com predomínio de óxidos de Fe e Al, confirmando o que já havia sido mencionado por MCKEAGUE e CLINE (1963).

Quanto ao Si acumulado na massa seca da parte aérea (SIPA) (Figura 7), observa-se que a aplicação do P no solo posterior a do Si promoveu um acúmulo expressivo de Si na matéria seca da parte aérea do sorgo, relativamente a não aplicação do P.

$$\text{SIPA (g kg}^{-1}\text{)} = -0,27746 + 1,00294*\sqrt{\text{Si}} + 1,7240**\sqrt{\text{P}} - 0,04560*\text{Si} \quad R^2 = 0,64$$

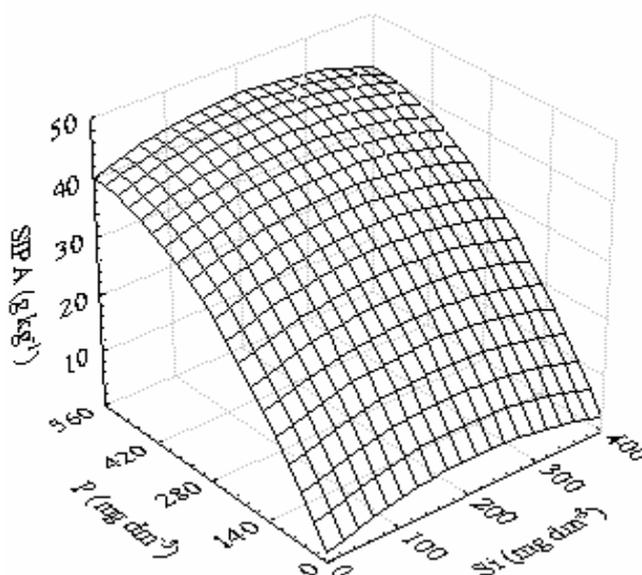


FIGURA 7. Silício na massa seca da parte aérea (SIPA) em função da aplicação de silício (Si) e fósforo (P) no solo.

** Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste t.

O acúmulo máximo de SIPA pode ser obtido pela aplicação de 120,93 mg dm^{-3} de Si e 565,1 mg dm^{-3} de P. Todavia, como esta dose de P é superior a maior dose testada, realizou-se o mesmo cálculo para o máximo acúmulo de SIPA, utilizando-se, no entanto, a maior dose de P aplicada (560 mg dm^{-3}), condição esta em que o acúmulo de SIPA encontrado é de 46,04 mg vaso^{-1} . Considerando o mesmo modelo, porém na ausência de P aplicado, o acúmulo de Si é de 5,24 mg vaso^{-1} , o que representa uma redução de 8,8 vezes no acúmulo de Si na parte aérea do sorgo.

Comparando-se o valor máximo para SIPA (46,04 mg vaso^{-1}) com o encontrado na ausência de Si aplicado (40,52 mg vaso^{-1}) constatou-se uma redução de apenas 1,1 vezes no valor do SIPA. Todavia, na ausência de Si e com a dose de 298,94 mg dm^{-3} de P aplicada, estimada para proporcionar a máxima produção de MSPA, o

valor de SIPA obtido é de 29,81 mg vaso⁻¹. Isto evidencia o processo de deslocamento do Si pelo P nos sítios adsorptivos, quando pós –aplicado ao Si, como observado por LEITE (1997) e CARVALHO et al. (2001).

Assim como no presente estudo, Bonadio et al. (2004), trabalhando com a mesma cultura observaram comportamento semelhante para o SIPA, quando da avaliação de diferentes fontes de Si.

Diante do exposto, percebe-se que as aplicações de Si e P ao solo elevaram os conteúdos destes elementos na massa seca da parte aérea do sorgo. Em outras palavras, o Si aplicado previamente ao P contribuiu muito menos para aumentos no acúmulo de P na parte aérea quando comparado com o P aplicado posteriormente ao Si, onde o P elevou muito mais o acúmulo de Si na parte aérea.

4.3 Avaliação das características do solo

Os valores médios dos teores de P recuperados pelos extratores Mehlich1 (PME1), Mehlich 3 (PME3) e Olsen (POLS), Si solúvel em solução de cloreto de cálcio (SISC) e pH do solo, após o cultivo do sorgo, em função da aplicação de Si e P no solo, estão no Quadro 7.

QUADRO 7. Teores de P recuperados pelos extratores Mehlich1, Mehlich 3 e Olsen, Si solúvel em cloreto de cálcio e pH do solo, após o cultivo do sorgo, em função de doses de silício (Si) e fósforo (P) aplicadas no solo.

Si (mg dm ⁻³)	P adicionado (mg dm ⁻³)				
	0	140	280	420	560
P Mehlich 1 (mg dm⁻³)					
0	1,76	9,77	26,18	50,99	75,57
100	1,88	9,37	25,22	47,76	75,55
200	2,00	8,83	26,98	48,74	75,59
300	2,01	7,90	25,69	39,89	71,68
400	2,26	8,83	22,42	42,89	69,12
P Mehlich 3 (mg dm⁻³)					
0	5,53	8,08	18,88	36,68	51,68
100	5,02	7,56	15,04	34,32	52,97
200	5,02	11,17	22,69	37,55	53,29
300	9,10	10,14	21,59	36,96	52,66
400	8,59	11,17	17,26	31,70	46,35
P Olsen (mg dm⁻³)					
0	2,67	19,20	43,23	71,23	98,92
100	6,90	21,29	43,68	71,72	98,41
200	9,95	23,87	47,40	72,10	99,85
300	11,53	25,42	49,35	74,68	106,10
400	14,82	24,75	47,02	76,20	103,94
Si (mg dm⁻³)					
0	17,19	19,49	20,88	21,34	22,74
100	19,96	18,11	20,42	19,49	20,88
200	21,35	21,81	23,21	25,55	26,49
300	25,08	24,61	25,08	27,91	32,19
400	26,96	26,02	27,90	28,85	32,18
pH do solo					
0	5,36	5,69	6,12	5,87	6,41
100	5,57	5,93	6,20	6,25	6,54
200	5,80	6,18	6,38	6,63	6,70
300	5,99	6,23	6,62	6,65	6,70
400	6,18	6,47	6,78	7,02	6,92

O PME1, PME3, POLS, SISC e o pH foram significativamente afetados pela aplicação de Si e P. Interações significativas foram constatadas apenas para PME1 e PME3 (Quadro 8).

QUADRO 8. Quadros médios da análise de variância de fósforo (P) recuperado pelos extratores Mehlich 1, Mehlich 3 e Olsen, silício (Si) solúvel em cloreto de cálcio e pH do solo, em função de doses de Si e P aplicadas.

Fonte de variação	G.L.	Mehlich 1	Mehlich 3	Olsen	Si solúvel CaCl ₂	pH solo
Bloco	3	14,45**	4,15 n.s	357,25 **	4,82 n.s	0,02**
Si	4	61,68**	46,44**	164,51*	296,86**	0,93**
P	4	16971,24**	7076,52**	27990,96**	82,22**	1,20**
Si x P	16	17,62**	19,67**	9,90n.s	5,98 n.s	0,02n.s
Resíduo	72	2,49	4,73	44,07	3,95	0,02
C.V (%)		5,07	8,95	13,13	22,25	2,29

* e **: significativo ao nível de 5 e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F e ns: não significativo

As concentrações de Si no solo aumentaram em função da aplicação do metassilicato de sódio. Resultados semelhantes também foram observados por MANFREDINI et al. (2004) e KORNDORFER et al. (1999), respectivamente, quando da aplicação de Wollastonita e silicato de cálcio.

A partir da equação de regressão ajustada para SISC como variável dependente de doses de Si, no conjunto das doses de P (Figura 8), percebe-se que a recuperação do Si no solo é da ordem de 0,02330 mg dm⁻³ por unidade de Si aplicada, ou seja, apenas 2,33% do Si aplicado, o que indica a ocorrência de prováveis mecanismos de adsorção deste elemento nos sítios de adsorção de ânions, bem como precipitações do Si solúvel (H₄SiO₄) com o Ca proveniente da calagem, previamente à aplicação do Si. A taxa de recuperação de Si em função de Si aplicado foi semelhante àquela constatada no trabalho de Leite (1997). No trabalho de CARVALHO (2000), com doses de Si aplicadas a um Latossolo Vermelho, constatou um valor de 6,53% de Si recuperado solúvel em água.

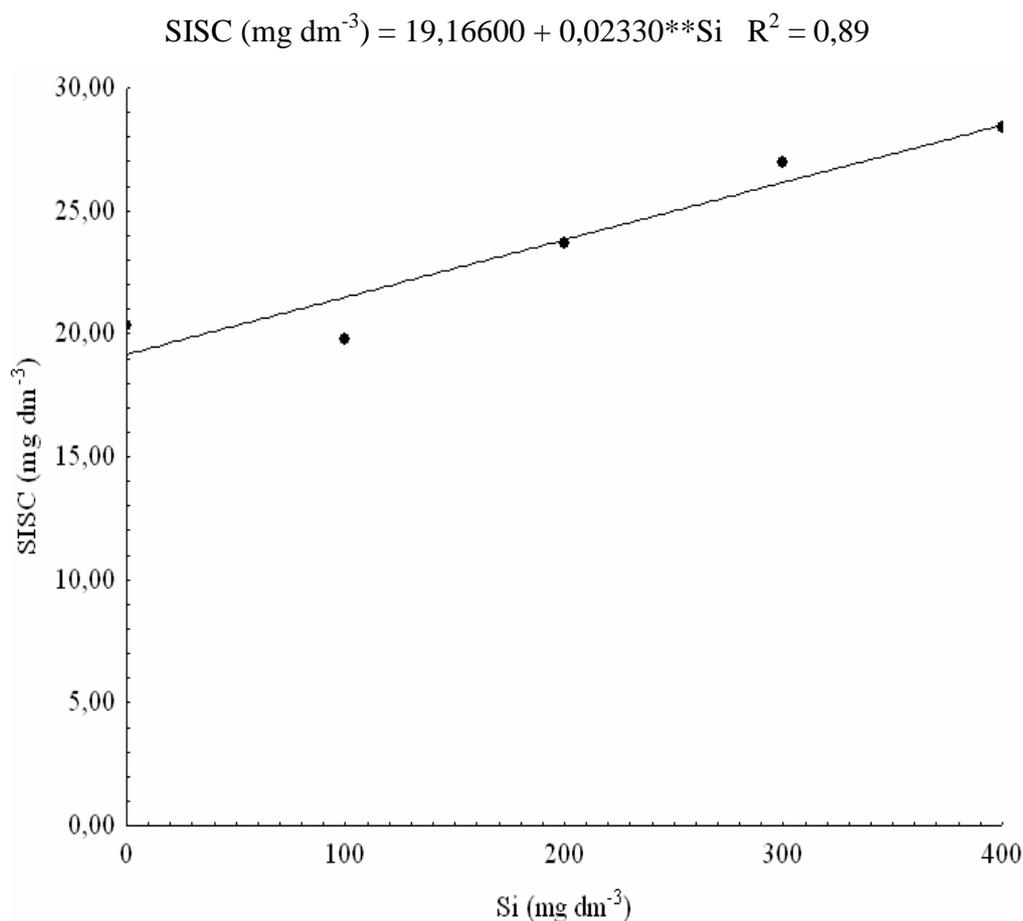


FIGURA 8. Silício no solo extraído por CaCl_2 (SISC) em função da aplicação crescente de silício (Si) no solo.

A recuperação do Si pela solução de CaCl_2 $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$, avaliada por meio do modelo da Figura 9, em função da aplicação de P no solo, é da ordem de 0,87%, isto é, para cada unidade aplicada de P a taxa de recuperação do Si é de $0,00871 \text{ mg dm}^{-3}$. LEITE (1997) constatou uma taxa de recuperação de 2,5 vezes menor do conteúdo de Si solúvel em CaCl_2 $2,5 \text{ mmol dm}^{-3}$ quando da aplicação de 100 mg dm^{-3} de P a um Latossolo Vermelho Aluminoférrico, predominantemente gibbsítico, com teor muito baixo de Si solúvel em solução de CaCl_2 $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$. Estes resultados revelam as baixas quantidades de Si fracamente adsorvidas à fase sólida do solo, extraídas pela solução de CaCl_2 $2,5 \text{ mmol L}^{-1}$.

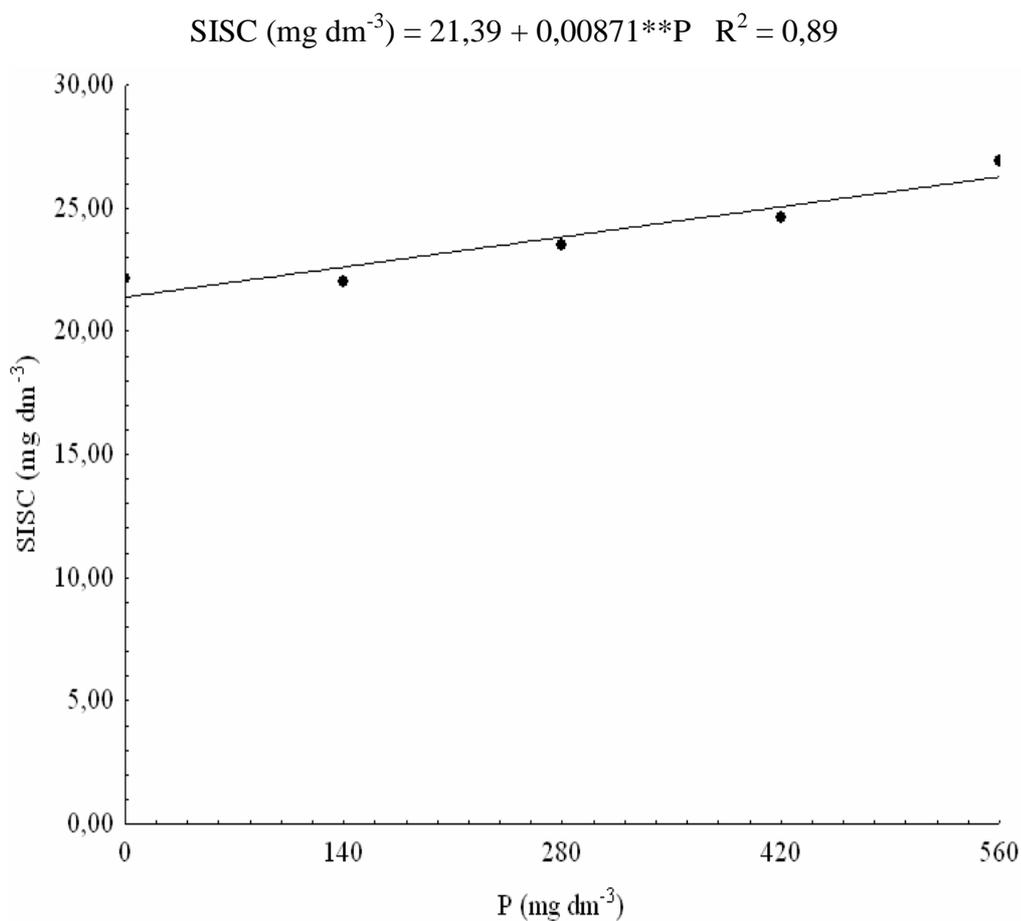


FIGURA 9. Silício no solo extraído por CaCl_2 (SISC) em função da aplicação de fósforo (P) no solo.

Os teores de P extraídos por Mehlich 1 e Mehlich 3 em função da adubação fosfatada foram negativamente influenciados pela aplicação prévia do Si (Figura 10 e 11). Apenas quando não se aplicou o P é que observou aumentos deste elemento com a aplicação de Si. Uma provável justificativa para estes resultados pode estar relacionada à exaustão do extrator, definida por HOLFORD (1980) como o consumo excessivo de íons H^+ da mistura ácida. O aumento do pH do solo proporcionado pela aplicação de P pode ter influenciado no desempenho do extrator.

$$\text{PME1}(\text{mg dm}^{-3}) = 0,99873 + 0,377088^{**}\sqrt{\text{Si}} - 1,95310^{**}\sqrt{\text{P}} - 0,01603^{**}\text{Si} + 0,21505^{**}\text{P} - 0,01679^{**}\sqrt{\text{SiP}}$$

$$R^2 = 0,95$$

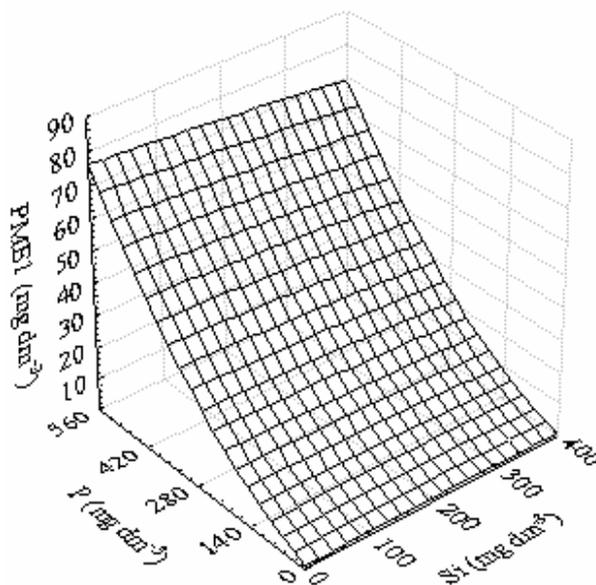


FIGURA 10. P extraído pelo Mehlich 1 (PME1) em função de silício (Si) e fósforo (P) aplicados ao solo.
 ** Significativo a 1% pelo teste t.

$$\text{PME3 (mg dm}^{-3}\text{)} = 3,98136 + 0,23440^{**}\sqrt{\text{Si}} - 1,46376^{**}\sqrt{\text{P}} + 0,14784^{**}\text{P} - 0,014210,01679^{**}\sqrt{\text{SiP}}$$

$$R^2 = 0,93$$

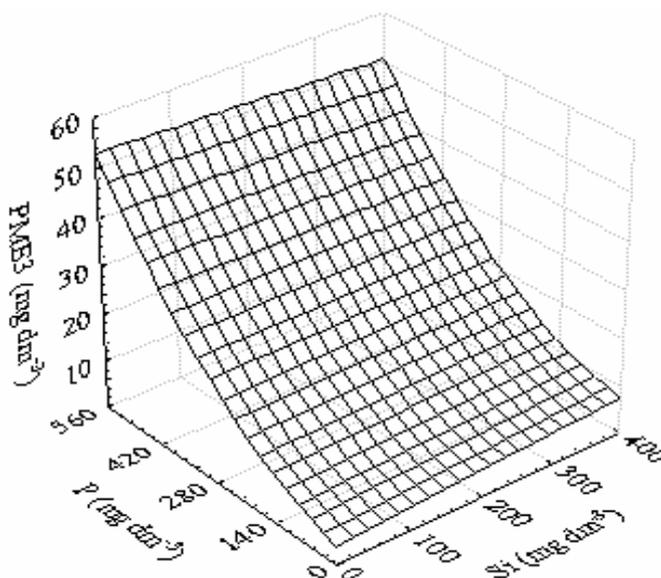


FIGURA 11. P extraído pelo Mehlich 3 (PME3) em função de silício (Si) e fósforo (P) aplicados ao solo.
 ** Significativo a 1% pelo teste t.

Equações de regressão ajustadas para POLS como variável dependente de doses de Si, no conjunto das doses de P ou dependente de doses de P, no conjunto das doses de Si podem ser vistas nas Figuras 12 e 13. Pode-se constatar que a aplicação de uma unidade de P ao solo proporcionou aumentos de $0,17 \text{ mg dm}^{-3}$ de P extraído por este extrator. Esse valor foi 9,5 vezes maior quando comparado à aplicação ao solo de uma unidade de Si, indicando a baixa eficiência de pré-aplicação de Si ao solo com grande capacidade de adsorção de P.

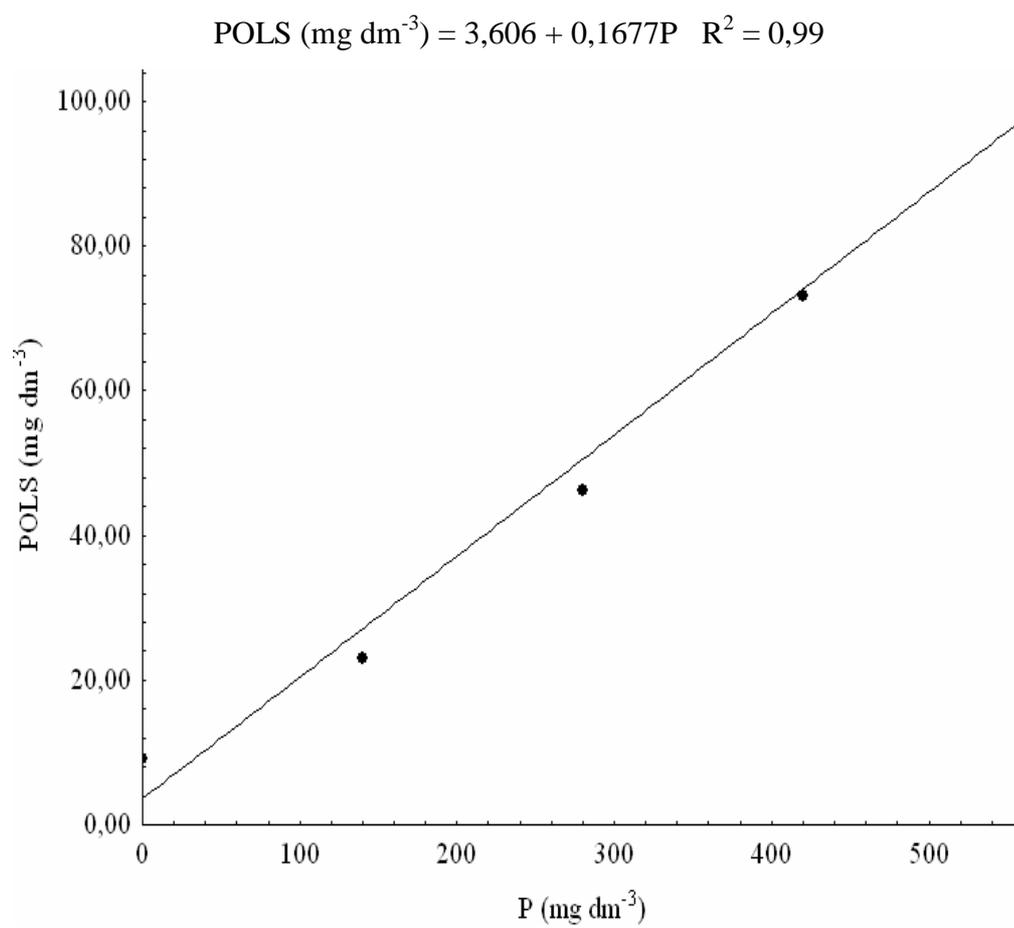


FIGURA 12. Fósforo (P) extraído pelo Olsen (POLS) em função de fósforo (P) aplicado ao solo.

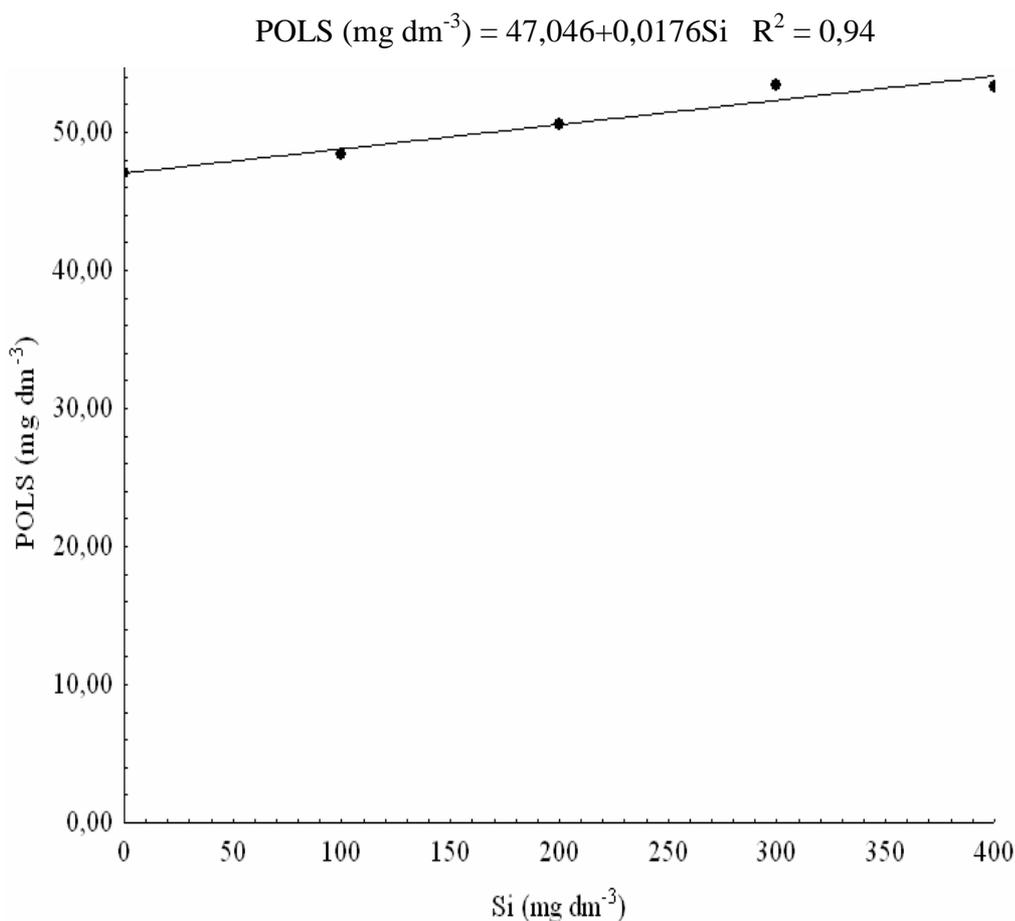


FIGURA 13. Fósforo (P) extraído pelo Olsen (POLS) em função de silício (Si) aplicado ao solo.

As taxas de recuperação de P no solo pelos extratores por unidade de P aplicado, tendo como referência a aplicação de 298,94 mg dm⁻³ de P (dose estimada para a produção máxima de massa seca da parte aérea) e a não aplicação, foram 17,47, 10,22 e 6,32 % para Olsen, Mehlich 1 e Mehlich 3 respectivamente. RAIJ (1978), em uma revisão sobre extratores químicos de P no solo menciona que o Olsen destaca-se pela sua superioridade e versatilidade em diferentes condições de solos, relativamente aos extratores ácidos, pela sua ação em dissolver as formas de P ligadas a alumínio as quais ocorrem quando se aplica fosfatos em solos ácidos.

Os coeficientes de correlação entre os teores de P no solo extraídos por Olsen ($r = 0,94$), Mehlich 1 ($r = 0,89$) e Mehlich 3 ($r = 0,88$) e P na parte aérea (PPA), significativos a 1% pelo teste de t, sugerem melhor habilidade do extrator Olsen, corroborando com CABALA e SANTANA (1983) e NEVES (2003), sendo esse melhor na detecção da ação do Si em ocupar sítio de adsorção de P, disponibilizando-o para as plantas. Dentre os diferentes extratores de P do solo estudado, para diferentes fontes

fosfatadas aplicadas na cultura do feijoeiro, em geral, Silva et al. (1999) encontraram melhor eficiência para os extratores Mehlich 3 (0,80**) e a resina (0,92**), correlacionando melhor com o acúmulo de P na massa seca das plantas. Para o Mehlich 1 foi observado um coeficiente de correlação linear não significativo de 0,29

Ao se considerar a aplicação de 140 mg dm^{-3} de Si ao solo, comparando com a não aplicação desse elemento, nota-se incremento do P extraído pelo Olsen da ordem de $2,46 \text{ mg dm}^{-3}$ de P; valor este correspondente a aplicação de $11,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 , estimado pelo modelo da Figura 13. A ação do Si aplicado via solo, na economia da fertilização fosfatada, depende, principalmente, do grau de intemperismo do solo que, por sua vez está relacionado com a mineralogia da fração argila e da atividade de silício na solução do solo.

Os valores de pH do solo (em água) foram significativamente influenciados pela aplicação de Si e P no solo, separadamente, possibilitou o ajuste de equações de regressão, sendo esta característica variável dependente de Si, no conjunto das doses de P ou dependente de P, no conjunto das doses de Si (Figuras 14 e 15).

FARIA (2000), esta elevação do pH com a aplicação de uma fonte solúvel de Si, como o resultado da liberação de OH^- ou, segundo PAIM et al. (2003), aos ânions de SiO_3^- resultante da dissociação iônica com um metal alcalino, atuando como bases de Bronsted - Lowry, capturando prótons de H^+ dissociados na solução do solo. Experimentalmente a elevação do pH o solo foi observada por PRADO et al. (2003), aplicando escória de siderurgia na cultura da cana-de-açúcar.

A elevação do pH do solo sem a aplicação de Si no solo está relacionada com a composição de duas fontes fosfatadas utilizadas no presente trabalho, KH_2PO_4 e NaH_2PO_4 que, quando solubilizadas, apresentam reações alcalinas.

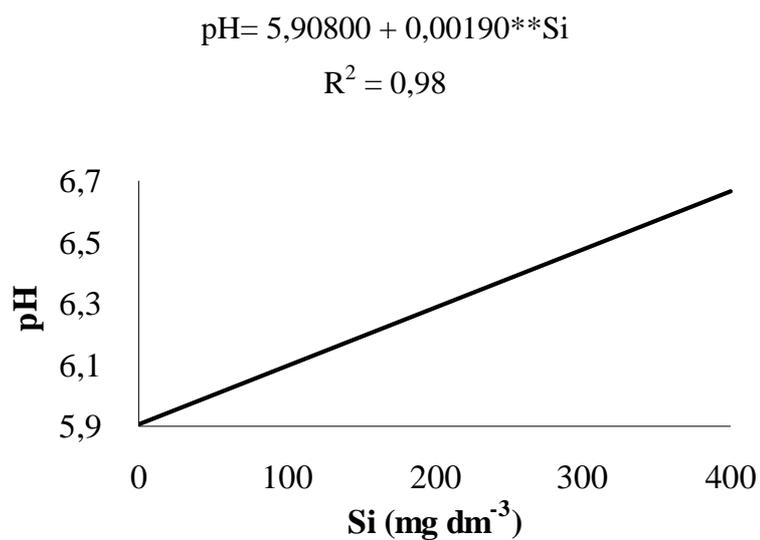


FIGURA 14. pH do solo em função da aplicação do silício (Si) no solo.

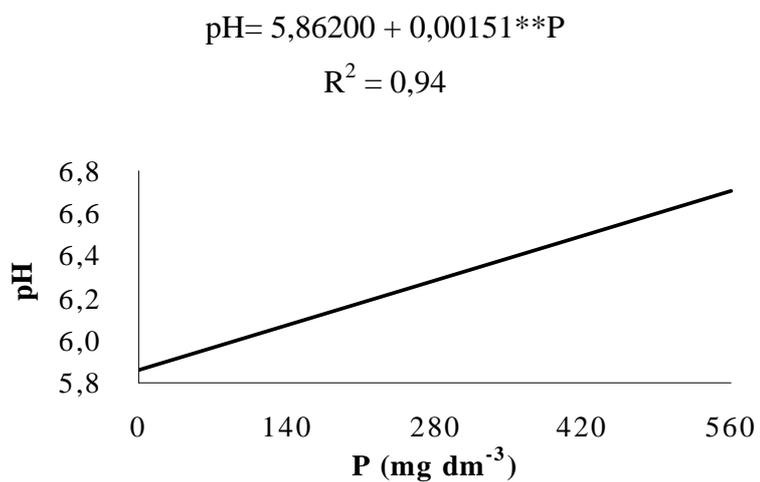


FIGURA 15. pH do solo em função da aplicação do fósforo (P) no solo.

CONCLUSÕES

Nas condições em que foi realizada a pesquisa, os resultados obtidos permitem concluir que:

A absorção de P pelo sorgo aumentou linearmente com a aplicação de Si antecipadamente à fertilização com fosfato.

A aplicação de Si no solo antecipadamente à fertilização com fosfato influenciou positivamente a taxa de recuperação do P aplicado, que foi mais bem detectada pelo extrator Olsen.

As características da planta de sorgo como matéria seca da parte aérea, diâmetro de colmo e estatura foram significativamente influenciadas somente pelas doses de P.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V, V. H.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. De Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, 25: 27 – 32. 2000.

ALVAREZ V, V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 14: 49 – 55. 1990.

ALVAREZ V., V. H. **Avaliação da fertilidade do solo**: superfícies de resposta – modelos aproximativos para expressar a relação fator-resposta. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1985. 75p.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, T. Formas preferenciais de de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana – de - açúcar na região Nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21: 643 - 650. 1997.

BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA J. M.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A. C. Relações entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de latossolos do Planalto Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7; 221 – 226. 1983.

BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA J. M.; RIBEIRO, A. C.; NOVAIS, R. F. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão do fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7: 243 – 249. 1983.

BAHIA FILHO, A. F. C.; VASCONCELOS, C. A.; SANTOS, H. L.; MENDES, J. F.; PITTA, G. V. E.; OLIVEIRA, A. C. Formas de fósforo inorgânico e fósforo “disponível” em um Latossolo Vermelho – Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 6: 99 – 104. 1982.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; PRABHU, A. S.; DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H. Importância do silício para a cultura do arroz (uma revisão de literatura). **Informações Agronômicas**, nº 89, 2000.

BELTRÁN, R. R.; SILVEIRA, R. I.; PASSOS, M. J. Disponibilidade de fósforo para plantas de arroz avaliada por extratores químicos. **Scientia. Agrícola**, 55: 233-241. 1998.

BLEVINS, D. G. Porque as plantas precisam de fósforo?. **Informações Agronômicas**, nº87, p. 1 – 4, 1999.

BONADIO, R. F.; ARAÚJO, L. S.; FERREIRA, D. A. A.; BRAGA, A. M. C.; NOLLA, A.; KORNDORFER, G. H.; **Disponibilidade de fósforo em solos da região do triângulo mineiro submetidos a diferentes condições de acidez**. Lages – SC, 2004. Anais...Lages, XXVI Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 2004. (Documento eletrônico).

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Deteminação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, 21:73 - 85. 1974.

BRAGA, J. M.; MASCARENHAS, A. A.; FEITOSA, C. T.; HIROCE, R.; RAIJ, B. van. Efeitos de fosfatos sobre o crescimento e produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 4: 36 – 39. 1980.

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

CABALA, P; SANTANA, M. B. M. Disponibilidade e diagnose de fósforo pela análise química do solo com referência ao Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7: 109 – 118. 1983.

CARVALHO, R.; NETO, A. E. F.; SANTOS, C. D.; FERNANDE, L. A.; CURI, N.; RODRIGUES, D. C. Interação silício – fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 26: 557 – 565. 2001.

CARVALHO, R.; FURTINI, NETO, A.; CURI, N.; FERNANDES, L. A.; OLIVEIRA Jr., A. C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24: 69 – 74. 2000.

CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Adsorção de fosfatos em solos com caráter ácrico avaliada por um modelo de complexação por superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21: 353 – 360 .1997.

CORREIA, J. R.; REATTO, A.; SPERA, S. T. Solos e suas relações com o uso e manejo. In: SOUZA, D. M. G. De.; & LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: EMBRAPA (EMBRAPA Cerrados), 2002. p. 29 - 58

DEFILIPPE, G. **Panorama da rocha fosfática e do ácido fosfórico**. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA. São Paulo – SP, 1990. Anais... São Paulo, IBRAFOS, 1990, 5^a ed. p. 5 – 9

DELAZARI, P. C.; BRAGA, J. M.; NOVAIS, R. F. Parâmetros de fósforo em função das características químicas e físicas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7: 55 – 60 .1983.

DYNIA, J. F.; CAMARGO, O. A. Efeitos da adubação fosfatada e da calagem sobre a adsorção de fósforo em um Latossolo Vermelho Escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 8: 865 - 868. 1997.

EMBRAPA. Recomendações técnicas para a cultura do sorgo granífero. Sete Lagoas: EMBRAPA/CNPMS. **Circular técnica**, 5, 1982. 39 p.

EMBRAPA. **Manual de método de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPMS, 1997. 212 p.

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

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28: 245 – 257. 2004.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O A. De.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, 58: 627 – 646. 2001.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, 1985. 466p.

HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity on critical levels and relationships between soil tests and labile phosphate in wheat-growing soils. Melbourne, **Australian Journal of Soil Research**, 18: 405-414. 1980.

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

KER, J.C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços em latossolos do Brasil**. 1995. 181 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES, V. A.; CORRÊA, G. F.; SNYDER, G. H. Efeito da aplicação de silicato de cálcio em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23: 623 – 629. 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. C. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana-de-açúcar e arroz. **Informações agronômicas**, nº70, 3p. 1995.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO M. S. De. Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura. Grupo de Pesquisa “Silício na Agricultura”: **Boletim técnico**, nº1, Uberlândia, 2002. p. 23.

LANNING, F. C.; LINKO, Y. Absorption and deposition of silica by four varieties of sorghum. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 9: 463 - 465. 1961

LEITE, P. CUNHA da. **Interação silício – fósforo em Latossolo Roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. 1997. 87 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

LIMA FILHO, O. F. De.; LIMA, M. T. G. De.; TSAI, S. M. O silício na agricultura. Encarte Técnico. In: **Informações Agronômicas**, nº87, p. 1 – 9, 1999

MAGALHÃES, A. F.; PAGE, A. L. Características das cargas elétricas dos solos da zona da mata de Pernambuco. I. Determinação das cargas de superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 8:173 – 177. 1984.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; SCHAFFERT, R. E. Fisiologia da planta de sorgo. EMBRAPA (Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo): **Circular técnica**, 3, Sete Lagoas, 2000. 46 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; DE OLIVEIRA S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS (Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato), 1989. 201 p.

MANFREDINI, D.; MELO, S. P.; TOALIARI, J. G.; FERNANDES, R. S.; MONTEIRO, F. A. **Relação silicato – fosfato em um Latossolo Vermelho – amarelo distrófico**. Lages – SC, 2004. Anais...Lages, XXVI Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 2004. (Documento eletrônico).

MA, J, TAKAHASHI, E. The effect of silicic acid on rice in a P - deficient soil. **Plant and Soil**, 126: 115 - 119. 1990 b.

McKEAUGUE, J.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions. II. The adsorption of monosilic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, 43: 83 – 96. 1963.

MEHLICH, A. Mehlich – 3 soil test extractant: a modification of Mehlich – 2 extractant. **Community Soil Science. Plant Analysis**, 12: 1409 – 1416. 1984.

MONCADA, J. O.; PUENTES, O.; MESA, L. J. Efecto del silicio sobre la disponibilidad de fosforo en un Andept y un Oxisol. **Agronomia Colombiana**, 8: 317 – 321.

MOURA FILHO, G.; RESENDE, M.; CRUZ, C. D. ALOCA - programa de estimativa de minerais do solo. Versão 1.0. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25, Viçosa - MG, 1995. Anais... Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995.(Software).

NETO, J. X. DE ALMEIDA; SOBRINHO, M. O. C. DO BRASIL. Fixação de fósforo em três solos sob cerrado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 1: 12 – 15. 1977.

NEVES, P.R. **Calagem, fontes e doses de fosfatos no cultivo de soja e suas relações com o fósforo recuperado por diferentes extratores químicos**. 2003. 61 f. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Dourados, 2003.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. **Aspectos físico – químicos envolvidos na fixação do fósforo no solo**. In: V Encontro nacional de rocha fosfática, São Paulo – SP, 1990. Anais... São Paulo, IBRAFOS, 1990, 5ª ed. 364 p.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J.; GARRIDO, W. E.; ARAÚJO, J. D.; LOURENÇO, S. **Método de pesquisa em fertilidade de solos**. Brasília: EMBRAPA – SEA, 1991. p. 189 – 253

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. **Methods of soil analysis** – Part 2. Chemical and microbiological properties, 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p. 403 – 430.

OTSUBO, A. A.; COUTINHO, E. L. M.. Saturação por bases, cálcio e magnésio na produção de massa seca de alfafa (*Medicago sativa* L.). **Revista Cerrados**, 2: 51 – 54. 1999/2001.

PAIM, L. ^a.; CARVALHO, R.; ABREU, C. M. P.; GUERREIRO, M. C. Estudo dos efeitos do silício e do fósforo na redução da disponibilidade de metais esados em área de mineração. **Química Nova**, 29: 28 - 33. 2003.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, 30: 1 – 50. 1978.

PEREIRA, H. S., KORNDÖRFER, G. H.; MOURA, W. F.; CORRÊA, G. F. Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , 27: 265-274. 2003.

PEREIRA, H. S.; VITTI, G. C.; KORNDÖRFER, G. H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: 101 - 108. 2003.

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-açúca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27: 287 - 296. 2003.

RAIJ, B. van; CAMARGO, O. **Sílica solúvel em solos**. **Bragantia**, 12: 223 – 236. 1973.

RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2: 1 – 9. 1983.

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

RODRIGUES, J. A. S. Híbridos de sorgo sudão e sorgo bicolor: alternativas de forrageiras para corte e pastejo. EMBRAPA (Centro Nacional de Pesquisa do Milho e Sorgo). **Circular técnica**, 4, Sete Lagoas, 2000. 22 p.

ROY, A.C.; ALI, M.V.; FOX, R.L.; SILVA, J.A. Influence of calcium silicate on phosphate solubility in Hawaiian Latossol. In: SYMPOSIUM ON SOIL FERTILITY AND EVALUTION, 1971, Honolulu. Proceedings ... Honolulu, 1971. p.756-765.

SCHUNKE, R. M.; MACEDO, M. C. M. Níveis críticos de fósforo no solo para *Calopogonium mucunoides* e *Centrosema acutifolium*. **Revista Cerrados**, 5: 13 – 20. 2002.

SCIVITTARO, W. B.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados fluídos e sólidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21: 509 – 511. 1997.

SFREDO, G.J; BORKERT, C.M.; CORDEIRO, D.S.; PALHANO, J.B.; DITTRICH, R.C. Comparação de cinco extratores de fósforo do solo, considerando-se o tempo de incorporação de três adubos fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 3: 111-115 1979.

SFREDO, G. J.; FILHO, E. P.; GOMES, E. R.; OLIVEIRA, M. C. N. De. Resposta da soja a fósforo e ao calcário em podzólico Vermelho – Amarelo de Balsas, MA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 20: 429 – 432. 1996.

SIENKO, M. J.; PLANE, R. A. **Química**. São Paulo: Nacional, 4ª ed., 2ª reimpressão, 1974. 650 p.

SILVA, W. M.; FABRÍCIO, A. C.; MARCHETTI, M. E.; KURIHARA, C. H.; MEDA, S.; HERNANI, L. C. Eficiência de extratores de fósforo em dois latossolos do Mato Grosso do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 34: 2277 - 2285. 1999.

SOUZA, D. M. G. De.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUZA, D. M. G. De.; & LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: EMBRAPA (EMBRAPA Cerrados), 2002. p. 147 - 167

SPOSITO, G. On the use of Langmuir equation in the interpretation of “adsorption” phenomena. II. The “two – surface” Langmuir equation. **Soil Science Society American Journal**, 40: 1147 – 1152. 1982.

STEFANUTTI, R.; MURAOKA, T.; MALAVOLTA, E. Comportamento de extratores em solo tratado com fontes diversas de fósforo. **Scientia Agrícola**. 51: 105 - 112. 1994.

TAN, K. H. **Principles of soil chemistry**. New York – NY: Marcel Dekker; 2ª ed., 1993. 360 p.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. New York – NY: Macmillan, 4ªed, 1984. 754 p.

THOMAS, G. W.; PEASLEE, D. E. Testing soil for phosphorus. In: WALSH, L. M.; BEATON, J. D. **Testing and Plant Analysis**. Madison: SSSA, 1973, p. - 115 - 132.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Dos. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, 62: 111 – 118. 2003.

VASCONCELLOS, C. A.; SANTOS, H. L. Dos.; BAHIA FILHO, A. F. C.; OLIVEIRA, A. C. PACHECO, E. B. Amostragem de solo em área com adubação fosfatada aplicada a lanço e no sulco de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 6: 221 – 225. 1982.