

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

**SOLUBILIDADE, EFEITO RESIDUAL E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA  
DE FONTES ALTERNATIVAS DE FOSFATOS**

**ALINE DA SILVA SANDIM**

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

BOTUCATU - SP  
AGOSTO DE 2016

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

**SOLUBILIDADE, EFEITO RESIDUAL E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA  
DE FONTES ALTERNATIVAS DE FOSFATOS**

**ALINE DA SILVA SANDIM**

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll

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

BOTUCATU - SP  
AGOSTO DE 2016

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

Sandim, Aline da Silva, 1988-

S217s Solubilidade, efeito residual e eficiência agronômica de fontes alternativas de fosfatos / Aline da Silva Sandim. - Botucatu : [s.n.], 2016  
xiv, 150 f. : fots. color., ils. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016

Orientador: Leonardo Theodoro Büll  
Inclui bibliografia

1. Solos - Teor de fósforo. 2. Fertilizantes fosfata- dos. 3. Resíduos como fertilizante. 4. Adubação. I. Büll, Leonardo Theodoro. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

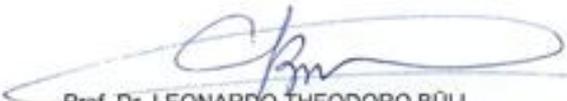
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA TESE: SOLUBILIDADE, EFEITO RESIDUAL E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FONTES ALTERNATIVAS DE FOSFATOS**

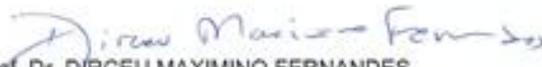
**AUTORA: ALINE DA SILVA SANDIM**

**ORIENTADOR: LEONARDO THEODORO BÜLL**

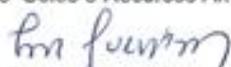
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. LEONARDO THEODORO BÜLL

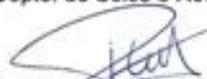
Dep de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Dep de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. IRAÉ AMARAL GUERRINI

Depto. de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Dr. JULIANO CORULLI CORRÊA

EMBRAPA SUÍNOS E AVES

Botucatu, 01 de agosto de 2016

*“O dia mais belo: hoje  
A coisa mais fácil: errar  
O maior obstáculo: o medo  
O maior erro: o abandono  
A raiz de todos os males: o egoísmo  
A distração mais bela: o trabalho  
A pior derrota: o desânimo  
Os melhores professores: as crianças  
A primeira necessidade: comunicar-se  
O que traz felicidade: ser útil aos demais  
O pior defeito: o mau humor  
A pessoa mais perigosa: a mentirosa  
O pior sentimento: o rancor  
O presente mais belo: o perdão  
o mais imprescindível: o lar  
A rota mais rápida: o caminho certo  
A sensação mais agradável: a paz interior  
A maior proteção efetiva: o sorriso  
O maior remédio: o otimismo  
A maior satisfação: o dever cumprido  
A força mais potente do mundo: a fé  
As pessoas mais necessárias: os pais  
A mais bela de todas as coisas: **O AMOR!**”*

*Madre Teresa de Calcutá*

Aos meus pais, *Ivone Maria da Silva Sandim* e *Sebastião Sandim* pelo apoio, incentivo, amor e confiança que me foram dados. Eles que abdicaram muitas vezes dos seus sonhos para realizarem os meus,

***DEDICO***

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a DEUS, por me dar saúde e por ter me abençoado durante toda a minha trajetória.*

*Aos meus pais, Sebastião e Ivone, que sempre me apoiaram e me ajudaram na medida do possível para que eu chegasse até aqui. Por todo incentivo, principalmente durante os momentos difíceis em que passei, onde a força e o amor dos meus pais foram essenciais para que eu conseguisse concluir meu doutorado. Relembrando sempre os encontros de família, quando eu retornava a Campo Grande e o churrasco com mandioca já estava me esperando. Amo vocês! Muito obrigada!*

*Aos meus irmãos, Adriana e Sebastião, meus grandes amigos que sempre me apoiaram nas decisões sobre estudos e escolhas de vida. Muito obrigada meus queridos!*

*Ao meu estimado orientador, Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll, que sempre deu apoio para que esse trabalho se realizasse, e sempre incentivou a minha formação profissional. É sob seu exemplo que guio meus passos. Muito obrigada!*

*Ao querido Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes, por ter me apoiado e por ter me ajudado a tomar decisões extremamente importantes para a conclusão do meu trabalho. Escolhas estas que me proporcionaram crescimento profissional e também pessoal. Muito obrigada, seus conselhos foram fundamentais.*

*Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro para realização deste trabalho, bem como à Capes, pelo financiamento da bolsa para o estágio de doutorado sanduíche nos Estados Unidos, o qual foi de grande importância na expansão do meu conhecimento profissional.*

*Aos meus queridos e estimados amigos Natália Rodrigues Ferreira e Elialdo Alves de Souza. Faltam-me palavras para agradecer toda ajuda e contribuição de vocês em minha tese. Natália, companheira e amiga que sempre me aconselhou, me ajudou em momentos difíceis e que compartilhou comigo inúmeras alegrias, seja no Brasil, Japão ou Estados Unidos. Elialdo, caro Eli, meu amigo e colega de casa. Quantos cafés tomamos juntos. Quantos conselhos você me deu, quantas broncas eu levei, porém todas foram válidas e construtivas. Tantas risadas, (sua gargalhada é inesquecível). Você é essa figura incomparável e única que tive a honra de conhecer. A vocês meus queridos, muito obrigada!*

*Ao meu querido amigo Edypo Jacob, por tantas vezes ter dividido momentos maravilhosos comigo, por todas as vezes em que fomos buscar almoço na Flor do Lageado, pelas festas da Única, por ter sido companheiro de tantas prosas e momentos felizes durante esta fase da minha vida. A você, meu querido amigo, muito obrigada!*

*Ao Paulinho e a Branca, que com todo carinho possível me ajudaram tantas vezes nas mais diversas situações, ora me buscando em Ourinhos, ora me emprestando o carro para ir de Avaré a Botucatu e por ter me recebido em seu lar com toda atenção e carinho de uma família. A vocês meus queridos, muito obrigada!*

*A Tokyo University, aos professores e amigos japoneses, em especial ao Hélio san e ao Kobata san que nos receberam, eu, Rose e Natalia, onde aprendemos muito sobre agricultura no continente asiático, além de toda a cultura de um país lindo que é o Japão, foi lá também que vi neve pela primeira vez, levarei sempre toda a experiência e sabedoria adquirida neste período.*

*Ao Dr. Chad Penn e a Oklahoma State University, que me deram a oportunidade de desenvolver parte de minha pesquisa. Aos amigos que fiz em Stillwater - OK, em especial Karina Souza, Samuel Zocca, Joshua Bradley e Tonny Carmeis que tanto me ajudaram durante o período em que lá estive.*

*A todos da Fazenda de extensão e pesquisa da FCA, em especial o senhor Mário, Flávio, Rubya e Carlos Humberto. Com eles tive a oportunidade de trabalhar e aprender muito, além de fazer amigos pra vida toda.*

*A todos os funcionários do Departamento de Recursos Naturais / Área de Ciência do Solo. Ao Pedrinho, que tantas vezes me ajudou nas coletas de amostra de solo, na instalação dos tensiômetros e na coleta da solução do solo. Ao José Carlos por todas as vezes que me auxiliou no laboratório. Ao Dorival, Jair, Noel, Adriana Ramos, Dpiere, Adriana, Felipe, Ademar, Silvinha, Maria Isabel, Larissa, Martha, Néia, Adilson, Isaura, Cristiane, obrigada por todo apoio.*

*Aos meus amigos pós-graduandos da FCA, que me apoiaram, me fizeram sorrir, e me ajudaram tantas vezes em diversas situações, Luciana Garcia (querida LuLu), que compartilhou comigo experiências no campo e em casa de vegetação, companheira de trabalho e amiga. Ao colega Jader Nantes, que me ajudou muito, ao cuidar do meu experimento enquanto estive no Japão. A Janaína Matias, queridíssima companheira de sushi e que por tantas vezes também me ajudou. A Moniki Janegtiz, por ter me ajudado imensamente com os trâmites da bolsa PDSE/ Capes.*

*Aos meus queridos e estimados amigos de Campo Grande, Miguel Menegazzo que já me ajudou tantas vezes, mesmo estando longe ou perto. Mônica Fraquetti, colega de profissão, parceira de tereré e chimarrão, de compras e de tantas confidências. Ao caro amigo Eder Jones que conheço desde a época da graduação, mas foi assim, de longe que nossa amizade fortaleceu e sempre permanecerá. Rafael Simões, meu amigo desde a infância, te admiro e te agradeço por tantas vezes ter compartilhado momentos comigo. Vocês foram e são essenciais em muitos momentos de minha vida. Muito obrigada!*

*Agradeço imensamente ao meu namorado, meu companheiro, meu amado Carlos Eduardo Del Canalle Filho por todo amor, carinho, atenção e respeito comigo. Você apareceu de repente e preencheu toda minha vida. Com você me sinto amada e feliz. Papai do céu me deu você de presente. Muito obrigada! Eu amo você!*

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

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE FIGURAS .....	XII
RESUMO .....	1
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUÇÃO .....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	8
2.1 Fósforo em solos tropicais .....	8
2.2 Fontes de Fósforo.....	10
2.3 Capacidade de fixação do fósforo em solos tropicais .....	15
2.4 Eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados.....	17
3. REFERÊNCIAS.....	19
CAPÍTULO I – Fertilidade do solo e resposta de potenciais fertilizantes fosfatados no crescimento do milho .....	25
RESUMO.....	25
ABSTRACT.....	26
4. INTRODUÇÃO .....	27
5. MATERIAL E MÉTODOS .....	28
5.1 Solo utilizado e condução do experimento .....	28
5.2 Delineamento experimental e avaliações .....	30
5.3 Capacidade máxima de adsorção de P no solo.....	31
5.4 Índice de eficiência agrônômica .....	33
5.5 Análise dos dados.....	33
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
6.1 Altura e Diâmetro do colmo das plantas de milho.....	33
6.2 Massa de matéria seca das plantas milho .....	37
6.3 Acúmulo de macronutrientes nas plantas de milho .....	40
6.4 Índices de Eficiência Agrônômica .....	47
7. CONCLUSÕES .....	49
8. REFERÊNCIAS.....	49
CAPÍTULO II – Fontes alternativas de fosfatos em solos oxídicos cultivados com milho .....	53
RESUMO.....	53
ABSTRACT.....	54
9. INTRODUÇÃO .....	55
10. MATERIAL E MÉTODOS .....	56
10.1 Delineamento experimental e avaliações .....	58
10.2 Capacidade máxima de adsorção de P no solo.....	59
10.3 Índice de eficiência agrônômica .....	62
10.4 Análise dos dados.....	62
11. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
11.1 Altura e diâmetro do colmo.....	62
11.2 Massa de matéria seca .....	65
11.3 Teor e acúmulo de P na planta .....	68

11.4 Acúmulo de macronutrientes .....	70
11.5 P na solução do solo .....	74
11.6 Índice de eficiência agronômica.....	75
12. CONCLUSÕES .....	76
13. REFERÊNCIAS .....	76
CAPÍTULO III - Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados no estabelecimento de <i>Urochloa brizantha</i> .....	81
RESUMO.....	81
ABSTRACT.....	82
14. INTRODUÇÃO .....	83
15. MATERIAL E MÉTODOS .....	84
15.1. Localização e instalação dos experimentos.....	84
15.2 Fontes utilizadas no experimento.....	85
15.3 Delineamento experimental e tratamentos utilizados .....	86
15.4 Condução do experimento.....	86
15.5 Parâmetros avaliados no solo .....	87
15.6 Capacidade máxima de adsorção de fósforo .....	87
15.7 Parâmetros avaliados na planta .....	88
15.8 Índice de Eficiência Agronômica (IEA) .....	89
15.9 Análise estatística.....	89
16. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
16.1 Capacidade máxima de adsorção de fósforo .....	89
16.2 pH do solo .....	92
16.3 Teor de P solo.....	94
16.4 Altura de plantas .....	96
16.5 Número de perfilhos.....	98
16.6 Número de folhas .....	100
16.7 Teor e Acúmulo P na planta.....	101
16.8 Acúmulo de Ca.....	106
16.9 Massa de matéria seca.....	108
16.10 Índice de eficiência agronômica (IEA) .....	111
17. CONCLUSÕES .....	114
18. REFERÊNCIAS.....	114
CAPÍTULO IV - Frações de fósforo em solos oxídicos após a aplicação de tradicionais e potenciais fertilizantes fosfatados .....	119
RESUMO.....	119
ABSTRACT.....	120
19. INTRODUÇÃO .....	121
20. MATERIAL E MÉTODOS .....	122
20.1 Caracterização dos solos .....	122
20.2 Definição e caracterização das matérias primas utilizadas .....	123
20.3 Incubação em placas de petri .....	124
20.4 Fracionamento de P no solo .....	126
20.5 Delineamento experimental e análise estatística.....	129

21. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	129
21.1 Análise de fracionamento do fósforo .....	129
21.2 P - lábil .....	129
21.3 P moderadamente lábil.....	132
21.4 P não lábil.....	135
21.5 P biológico .....	136
21.6 P geoquímico.....	140
21.7 P total .....	142
22. CONCLUSÕES .....	144
23. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	145
24. REFERÊNCIAS.....	145

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I – Fertilidade do solo e resposta de potenciais fertilizantes fosfatados no crescimento do milho

<b>Tabela 1.</b> Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento analisados de 0 a 20 cm de profundidade .....	29
<b>Tabela 2.</b> Características químicas dos materiais fosfatados .....	29
<b>Tabela 3.</b> Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas .....	29
<b>Tabela 4.</b> Valores de P-rem e intervalo para doses de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de P.....	31
<b>Tabela 5.</b> Parâmetros de isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para os solos estudados .....	32

### CAPÍTULO II – Fontes alternativas de fosfatos em solos oxídicos cultivados com milho

<b>Tabela 6.</b> Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento, coletados na camada 0-20 cm de profundidade.....	57
<b>Tabela 7.</b> Características químicas dos materiais fosfatados .....	57
<b>Tabela 8.</b> Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas (%). .....	58
<b>Tabela 9.</b> Valores de P-rem e intervalo para doses de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de P.....	60
<b>Tabela 10.</b> Parâmetros de isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para os solos estudados .....	62
<b>Tabela 11.</b> Valores de altura de plantas em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos.....	63
<b>Tabela 12.</b> Valores de diâmetro de colmo de plantas de milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos. ....	65
<b>Tabela 13.</b> Valores de produção de massa de matéria seca da parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos. ....	66
<b>Tabela 14.</b> Valores teor de P em $g\ kg^{-1}$ na parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos. ....	68
<b>Tabela 15.</b> Valores acúmulo de P na parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos.....	69
<b>Tabela 16.</b> Acúmulo de macronutrientes $mg\ vaso^{-1}$ na parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos. ....	71
<b>Tabela 17.</b> Concentração de P na solução do solo ( $mg\ L^{-1}$ ) em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos.....	74

### CAPÍTULO III - Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados no estabelecimento de *Urochloa brizantha*

<b>Tabela 18.</b> Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento, coletados na camada de 0-20 cm de profundidade .....	84
--	----

**Tabela 19.** Características dos materiais fosfatados.....85  
**Tabela 20.** Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas (%)......86  
**Tabela 21.** Tratamentos utilizados no experimento. ....86  
**Tabela 22.** Valores de P-rem, níveis e intervalo para doses de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de P .....87  
**Tabela 23.** Parâmetros de isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para os solos estudados .....91

CAPÍTULO IV - Frações de fósforo em solos oxídicos após a aplicação de tradicionais e potenciais fertilizantes fosfatados

**Tabela 24.** Características químicas iniciais do solo avaliadas de 0 a 0,20 m de profundidade .....123  
**Tabela 25.** Características dos materiais fosfatados.....124  
**Tabela 26.** Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas (%)......124

## LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I – Fertilidade do solo e resposta de potenciais fertilizantes fosfatados no crescimento do milho.

<b>Figura 1.</b> Visão geral do experimento aos 15 e 55 DAE. ....	30
<b>Figura 2.</b> Representação gráfica da capacidade máxima de adsorção do solo, por meio do P ajuste da curva de adsorção à equação da isoterma de Langmuir, (A) solo LVD <sub>1</sub> , com alto teor de inicial e (B) solo LVD <sub>2</sub> , com baixos teores de P. ....	32
<b>Figura 3.</b> Altura das plantas milho, solo LVD <sub>2</sub> , em função da aplicação de fontes e doses de fósforo. ....	33
<b>Figura 4.</b> Diâmetro do colmo das plantas milho, solo LVD <sub>1</sub> (A) e solo LVD <sub>2</sub> (B), em função da aplicação de fontes e doses de fósforo ....	35
<b>Figura 5.</b> Produção de massa de matéria seca de plantas milho, solo LVD <sub>1</sub> (A) e solo LVD <sub>2</sub> (B), em função da aplicação de fontes e doses de fósforo ....	37
<b>Figura 6.</b> Plantas de milho aos 55 DAE com adição de superfosfato triplo (SFT. (A) solo LVD <sub>1</sub> com 30 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVD <sub>2</sub> com 3,9 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente.. ....	39
<b>Figura 7.</b> Plantas de milho aos 55 DAE com adição de fosfato natural reativo (FNR) ao solo. (A) solo LVD <sub>1</sub> com 30 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVD <sub>2</sub> com 3,9 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente.....	39
<b>Figura 8.</b> Plantas de milho aos 55 DAE com adição de fosfato precipitado 1 (FP1). (A) solo LVD <sub>1</sub> com 30 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVD <sub>2</sub> com 3,9 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente.. ....	40
<b>Figura 9.</b> Plantas de milho aos 55 DAE com adição de fosfato precipitado 2 (FP2). (A) solo LVD <sub>1</sub> com 30 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVD <sub>2</sub> com 3,9 mg dm <sup>-3</sup> de P inicialmente ....	40
<b>Figura 10.</b> Acúmulo de macronutrientes na planta de milho, solo LVD <sub>1</sub> onde (A e B) representam acúmulo de P, Ca e Mg; (C) acúmulo de nitrogênio; (D) acúmulo de nitrogênio e potássio; (E) acúmulo de enxofre em função da aplicação de fontes e doses e P.....	41
<b>Figura 11.</b> Acúmulo de macronutrientes na planta de milho, solo LVD <sub>2</sub> onde (A) representam acúmulo de P, (B) acúmulo de cálcio, (C) acúmulo de magnésio, (D) acúmulo de nitrogênio (E) acúmulo de potássio e (F) acúmulo de enxofre, em função da aplicação de fontes e doses de P.....	45
<b>Figura 12.</b> Índices de eficiência agrônômica de fosfatos (%) em função de doses e fontes de P na cultura do milho, onde (A) solo LVD <sub>1</sub> e (B) solo LVD <sub>2</sub> ... ..	47

CAPÍTULO II – Fontes alternativas de fosfatos em solos oxídicos cultivados com milho

<b>Figura 13.</b> Visão geral do experimento aos 15 dias após a emergência .....	58
<b>Figura 14.</b> Ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de adsorção de Langmuir para os solos estudados onde (A) solo RQ <sub>1</sub> ; (B) solo RQ <sub>2</sub> ; (C) solo LVdf; (D) solo LVD <sub>1</sub> e (E) solo LVD <sub>2</sub> .61	
<b>Figura 15.</b> Plantas de milho aos 55 DAE em função da adição de fontes de fosfato em solos oxídicos, onde (A) solo RQ <sub>1</sub> ; (B) solo RQ <sub>2</sub> ; (C) solo LVdf; (D) solo LVD <sub>1</sub> e (E) solo LVD <sub>2</sub> .67	

**Figura 16.** Eficiência Agronômica em função do tipo de solo e fontes fosfatadas.....76

CAPÍTULO III - Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados no estabelecimento de *Urochloa brizantha*

**Figura 17.** Temperatura e precipitação média mensal no período entre meses de abril de 2013 a dezembro de 2013 .....85

**Figura 18.** Ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de adsorção de Langmuir para as doses P estudadas em um LATOSSOLO Vermelho distrófico. ....90

**Figura 19.** pH (CaCl<sub>2</sub>) em LATOSSOLO Vermelho distrófico em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinado após a colheita das plantas. ....93

**Figura 20.** Teor de Presina em LATOSSOLO Vermelho distrófico em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinado após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte.....95

**Figura 21.** Altura de plantas em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte 97

**Figura 22.** Número de perfilhos em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte .....99

**Figura 23.** Número de folhas em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte. ....101

**Figura 24.** Teor de fósforo na planta em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte.....102

**Figura 25.** Acúmulo de fósforo na planta em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C e D) 3º corte, (E) 4º corte, (F) Total.....104

**Figura 26.** Acúmulo de Ca na planta em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C e D) 3º corte, (E) 4º corte, (F) Total.....107

**Figura 27.** Produção de massa de matéria seca em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C e D) 3º corte, (E) 4º corte .....109

**Figura 28.** Índices de eficiência agronômica de fosfatos (%) em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo de P nos quatro cortes realizados e total, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte, (E) Total .....112

CAPÍTULO IV - Frações de fósforo em solos oxídicos após a aplicação de tradicionais e potenciais fertilizantes fosfatados

**Figura 29.** Representação gráfica da capacidade máxima de adsorção do solo, por meio do ajuste da curva de adsorção à equação da isoterma de Langmuir, (A) solo RQ, textura arenosa, (B) solo LVdf, textura argilosa .....123

<b>Figura 30.</b> Procedimento utilizado para a incubação em placas de petri (A) Pesagem do solo; (B) adição de água; (C) adição do fertilizante; (D) placa de petri etiquetada; (E) placas recobertas para incubação .....	125
<b>Figura 31.</b> Procedimento de amostragem das secções circulares das placas de petri .....	126
<b>Figura 32.</b> Esquema de extração sequencial e determinações de P em solo, onde as siglas Pi, representam fósforo inorgânico, Po, fósforo orgânico e Pt, fósforo total. Os extratores representados pelas siglas RTA, resina de; BIC, bicarbonato de sódio; HCL, ácido clorídrico e Hid hidróxido de sódio.....	128
<b>Figura 33</b> - Teores de fósforo lábil no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C – pH 4,2 D – pH 6,0).....	130
<b>Figura 34.</b> P moderadamente lábil - solo RQ, arenoso (A - pH 4,1 B - pH 6,2); solo LVdf, argiloso (C – pH 4,2 D – pH 6,0).....	133
<b>Figura 35.</b> Teores de fósforo não lábil no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C – pH 4,2 D – pH 6,0).....	136
<b>Figura 36.</b> Teores de fósforo biológico no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C – pH 4,2 D – pH 6,0).....	138
<b>Figura 37.</b> Teores de fósforo geoquímico no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6.2) e no solo LVdf, (C – pH 4,2 D – pH 6,0).....	140
<b>Figura 38.</b> Teores de fósforo total no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C – pH 4,2 D – pH 6,0).....	142

## SOLUBILIDADE, EFEITO RESIDUAL E EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FONTES ALTERNATIVAS DE FOSFATOS

### RESUMO

Atualmente, a produção de fertilizantes fosfatados acidulados gera muitos rejeitos e entre esses estão materiais ainda relativamente ricos em P, cujo aproveitamento ainda não é possível pelos atuais métodos industriais. Isso tem representado, portanto, um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante, devido aos grandes volumes envolvidos. Estes “novos” fertilizantes foram testados nas mais distintas condições de solo e, portanto ainda não se sabe exatamente qual será seu desempenho agronômico em condições distintas. Diante do exposto, a seguinte hipótese geral foi testada: fertilizantes fosfatados cuja solubilidade é baixa podem apresentar comportamento e desempenho agronômico semelhante aos superfosfato triplo dependendo das condições do solo e manejo. Para tal, foram realizados quatro experimentos em condições de vaso em casa de vegetação, em campo e em laboratório. Dois experimentos foram realizados em casa de vegetação, variando doses, fontes de P (superfosfato triplo, fosfato natural reativo, fosfato precipitado – FP1 1 e fosfato precipitado 2 – FP2) e tipos de solo, cultivados com milho como planta teste. Nas condições do primeiro experimento onde houve variação de doses e fontes, o solo utilizado, foi coletado em condições distintas, isto é, na primeira situação o solo apresentava  $3 \text{ mg dm}^{-3}$  de P e na segunda situação o mesmo solo apresentava  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  de P. Neste experimento pôde-se observar que, onde havia fósforo residual no solo, proveniente de adubações anteriores, os resíduos utilizados, proporcionaram produção de massa de matéria seca (70g por vaso) e índices de eficiência agronômica (75%) semelhantes ao superfosfato triplo (100g por vaso), concluindo que em situações de fertilidade construída, em especial, a fonte alternativa FP1, pode ser utilizada em cultivos com culturas anuais. No segundo experimento foram utilizados cinco solos com diferentes texturas, todos oxídicos, ácidos e com baixo teor de fósforo. Nesta situação, pôde-se concluir que a maior produção de massa de matéria seca do milho (79g por vaso) e o maior índice de eficiência agronômica dos resíduos (75%) foram alcançados também com a fonte FP1, em solos com baixa a média capacidade de adsorção de fósforo quando comparado a solos de alta CMAP. No experimento realizado em condições de campo, a espécie utilizada como teste foi a *Urochloa brizantha*, cultivar Marandú, com variação do pH do solo e uso das diferentes fontes de fósforo, além do tratamento controle, sem fósforo e sem correção do solo. Neste experimento foram realizados 4 cortes do capim *Urochloa brizantha*, com o objetivo de observar o efeito residual e o aproveitamento do P pela cultura fornecido por cada fonte. Pôde-se concluir que, a pastagem obteve maior produção de massa de matéria seca ( $6 \text{ t ha}^{-1}$ ) e o maior índice de eficiência agronômica (181%) foi obtido com o uso da fonte alternativa FP1, em condições de V% 45, intermediário, exceto no primeiro corte onde a disponibilidade de P foi maior pelo superfosfato triplo, já que é uma fonte solúvel. Indicando ser essa fonte, o FP1, um potencial fertilizante fosfatado em especial para espécies de ciclo perene como as pastagens. O quarto experimento foi realizado em condições de laboratório com o objetivo de determinar quais as formas de fósforo seriam disponibilizadas por cada fertilizante a partir do uso da metodologia de fracionamento de fósforo. Neste experimento houve variação da textura do solo (argiloso e arenoso), do pH do solo (ácido e moderadamente ácido) e distância do grânulo. Pôde-se observar, que as formas lábeis de fósforo, mais

próximas do grânulo, foram em sua maioria, disponibilizadas pela fonte solúvel e pela fonte alternativa FP1 quando comparada com o fosfato natural reativo e com o a fonte alternativa FP2. Portanto, sabendo-se da importância atual da reutilização de materiais antes considerados rejeitos, conclui-se que a fonte alternativa FP1 pode ser considerada um potencial fertilizante fosfatado para utilização em culturas de ciclo perene como pastagens, ou em solos de fertilidade construída em cultivos com plantas anuais.

Palavras chave: Fósforo; Disponibilidade; Difusão de fósforo; Adsorção de fósforo; Adubação; Fertilizantes fosfatados.

## **SOLUBILITY, RESIDUAL EFFECTS AND SOURCES OF EFFICIENCY AGRONOMIC ALTERNATIVE PHOSPHATE**

Botucatu, 2016. 166 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Author: ALINE DA SILVA SANDIM

Adviser: LEONARDO THEODORO BÜLL

### **ABSTRACT**

Currently, the production of phosphate fertilizers acidulated generates many residues and between these materials are still relatively rich in P, whose use is not yet possible by the current industrial methods. This has meant, however, not used a mineral well and disturbing environmental problem due to the large volumes involved. These "new" fertilizer were tested in very diverse soil conditions and therefore it is not known exactly what will be their agronomic performance under different conditions. Given the above, the following general hypothesis was tested: phosphate fertilizers whose solubility is low may have agronomic behavior and performance similar to triple superphosphate depending on soil conditions and management. To this end, four experiments were carried out in vessel conditions in the greenhouse, in the field and in the laboratory. Two experiments were conducted in a greenhouse, varying doses, phosphorus sources (triple superphosphate, reactive phosphate, precipitated phosphate - FP1 1 and precipitated phosphate 2 - FP2) and soil types, cultivated with corn as a test plant. Under the conditions of the first experiment where there was a variation of dosages and sources soil used was collected at different conditions, in the first situation the soil had  $3 \text{ mg dm}^{-3}$  P and in the second position the same soil had  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  P. In this experiment it was observed that, where there was residual phosphorus in the soil of previous manuring, the waste used, provided mass production of dry matter (70 g per pot) and agronomic efficiency ratios (75% ) similar to the triple superphosphate (100g per pot), concluding that fertility in situations constructed, in particular, the alternative source FP1 can be used in crops for annual crops. The second experiment used five soils with different textures, all oxidic, acids and low phosphorus content. In this situation, it could be concluded that the increased production of dry matter corn (79g per pot) and the highest agronomic efficiency of waste (75%) were also achieved with the FP1 source, low in soils average phosphorus sorption capacity when compared to high MAPC soils. In the experiment carried out under field conditions, the species used as a test was *Urochloa brizantha* cultivate Marandú with variation of soil pH and use of different sources of phosphorus, beyond the control treatment without phosphorus and without soil correction. In this experiment were performed 4 grass courts *Urochloa brizantha*, in order to observe the residual effect and the use of P by culture provided by each source. It was concluded that the pasture had higher mass of dry matter production ( $6 \text{ t ha}^{-1}$ ) and the highest agronomic efficiency (181%) was obtained with the use of alternative source FP1, V% 45 conditions , intermediate, except in the first cut where the availability of P was higher by triple superphosphate, as it is a soluble source. Indicating that this source, the FP1, a potential phosphate fertilizer especially for species of perennial cycle as pastures. The fourth experiment was conducted in laboratory conditions in order to determine the phosphorus forms would be made available for each fertilizer from the use of phosphorus fractionation methodology. In this experiment there was variation in soil texture (clayey and sandy) soil

pH (acid and moderately acid) and distance from the bead. It was observed that the labile P forms, closer to the bead, were mostly provided by soluble source and the alternate source FP1 compared with the reactive phosphate rock and the alternative source FP2. Therefore, knowing if the current importance of reuse of materials previously considered tailings, it is clear that an alternative source FP1 can be considered as a potential phosphatic fertilizer for use in continual cycle crops such as grass, or soil fertility built in cultures with annual plants.

Keywords: Phosphorus; Availability; phosphorus diffusion; Phosphate sorption; Fertilizing; Phosphate fertilizers.

## 1. INTRODUÇÃO

O manejo adequado da adubação fosfatada é crucial para o sucesso da atividade agrícola. Isto se torna mais importante pelo eminente fim das rochas fosfatadas de elevada qualidade (ROSEMARIN et al., 2009). Estima-se que de 30% a 50% da produção mundial obtida nos sistemas de produção agrícola deve ser atribuída à adição de nutrientes no solo via fertilizantes (STEWART et al., 2005). Esta porcentagem tende a ser muito superior nas regiões tropicais, devido à deficiência generalizada de nutrientes no solo. Porém, espera-se que justamente nestas regiões sejam produzidos grande parte dos alimentos, fibra e energia que o planeta demanda. Ressalta-se, ainda, que os fosfatos são recursos naturais não renováveis, escassos e sem sucedâneos, devendo, portanto, ter utilização eficaz (PRADO e FERNANDES, 1999).

Dentre os macronutrientes primários, o fósforo é o que apresenta a maior variação quanto aos fertilizantes disponíveis no mercado. As principais fontes de fósforo (P) utilizadas na agricultura são obtidas industrialmente pelo tratamento de rochas fosfáticas (RF) com ácidos que possuem elevada solubilidade em água, como os superfosfatos e os fosfatos de amônio. Nos solos tropicais agricultáveis, essas fontes têm rápida dissolução, favorecendo a interação do elemento com o solo e reduzindo a disponibilidade de P às plantas. Nos últimos anos, a utilização de fontes alternativas,

aumentou acentuadamente, embora esses produtos tenham baixa solubilidade em água quando comparados aos fosfatos solúveis (HOROWITZ ; MEURER, 2003).

Sendo os minerais fosfáticos um recurso natural escasso, finito e sem substituto, seu manejo deve ser realizado da melhor forma possível, até pelo fato de que as reservas de excelente qualidade já se exauriram ou estão muito próximas disto. Em virtude disso o setor de fertilizantes está cada vez mais dependente do uso das rochas fosfáticas de qualidade inferior consideradas, no passado, como marginais para a produção de fertilizantes fosfatados totalmente acidulados. Porém, o emprego destas rochas na produção de fertilizantes fosfatados via acidulação, comumente gera resíduos insolúveis no produto final (MULLINS et al., 1990). Assim, faz-se necessário o estudo de fertilizantes produzidos a partir destas matérias primas marginais e a compreensão dos mecanismos envolvidos na sua dinâmica no solo além da comparação com as fontes tradicionalmente empregadas na agricultura.

As rochas fosfáticas de qualidade inferior, também podem ser empregadas para a produção de fertilizantes acidulados sem que haja o temor de não cumprimento da legislação. No entanto, a decisão de aquisição ou não destas fontes por parte dos agricultores dependerá de vários fatores, entre eles, o custo e a comprovação de sua eficiência agronômica. Estes “novos” fertilizantes ainda não foram testados nas mais distintas condições de solo e, portanto ainda não se sabe exatamente qual será seu desempenho agronômico em condições extremas (COQUI, 2013). Aliado a isso, atualmente o uso de resíduos industrial ou animal também tem sido alternativas de otimizar o uso do fósforo na agricultura já que a produção de fertilizantes fosfatados gera muitos rejeitos e entre esses estão materiais ainda relativamente ricos em P, cujo aproveitamento ainda não é possível pelos atuais métodos industriais. Isso tem representando, portanto, um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante, devido aos grandes volumes envolvidos.

O requerimento de grandes quantidades de fosfatos na correção da fertilidade da maioria dos solos brasileiros, e a ausência de reservas finitas de rochas com alto teor de P associados ao elevado custo dos fertilizantes, justificam estudos para otimizar a eficiência no uso de fertilizantes fosfatados. A grande variação na solubilidade dos fosfatos seja ele natural, ou industrializado, resíduos que contém quantidades consideráveis de P, a interação do fertilizante com os componentes do solo, a forma de

utilização, e as características da planta cultivada, são fatores que reforçam ainda mais a necessidade de estudos voltados para adubação fosfatada.

Diante do exposto, a seguinte hipótese geral foi testada: Fertilizantes fosfatados cuja solubilidade é baixa podem apresentar comportamento e desempenho agrônômico semelhante aos superfosfato triplo.

Para tal, foram realizados quatro experimentos em condições de vaso em casa de vegetação, em campo e em laboratório. Estes experimentos foram divididos para serem apresentados individualmente no formato de capítulos, a saber:

- I – Fertilidade do solo e resposta de potenciais fertilizantes fosfatados no crescimento do milho;
- II - Fontes alternativas de fosfatos em solos oxídicos cultivados com milho;
- III - Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados no estabelecimento de *Urochloa brizantha*;
- IV- Frações de fósforo em solos oxídicos após a aplicação de tradicionais e potenciais fertilizantes fosfatados.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Fósforo em solos tropicais**

A dinâmica do fósforo no solo está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, e às propriedades físicoquímicas e mineralógicas do solo. Assim, em solos jovens e nos moderadamente intemperizados, como os Vertissolos, Chernossolos e os Neossolos, ainda ocorre fósforo em minerais primários, mas a maior parte deste elemento se encontra na forma orgânica (Po), ou na forma mineral (Pi), adsorvida fracamente aos minerais secundários. Nos solos altamente intemperizados, como os Latossolos, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente. De acordo com o maior ou menor grau de estabilidade destes compostos, são enquadrados como fosfatos lábeis e não-lábeis. A fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando ele é absorvido por plantas ou por microrganismos. Por isso, as frações mais lábeis são dependentes do grau de intemperização do solo, da mineralogia, da textura, do teor de matéria orgânica, das características físico-químicas, da atividade biológica e da vegetação predominante (WALKER & SYERS, 1976; CROSS & SCHLESINGER, 1995). Assim, os processos geoquímicos e biológicos transformam os

fosfatos naturais em formas orgânicas e inorgânicas estáveis e transferem o fósforo entre os compartimentos do ambiente.

Os fertilizantes fosfatados são utilizados tanto para aumentar a produtividade das culturas em solos deficientes em fósforo como para manter a alta produtividade em solos não deficientes neste nutriente. O efeito imediato e residual do fertilizante fosfatado para as culturas depende, em grande parte, das reações desenvolvidas entre o fertilizante e o solo após sua aplicação.

As reações que envolvem a transformação do fósforo da solução do solo em fósforo inorgânico na fase sólida são adsorção e precipitação. A adsorção de fósforo é chamada adsorção química ou específica, para diferenciá-la do tipo de adsorção que envolve ligações altamente eletrostáticas. É uma reação de troca de ligantes, em que oxidrilas ou moléculas de água, coordenadas com cátions da superfície de minerais como alumínio e ferro da superfície de óxidos, são deslocadas pelo ânion fosfato, formando-se um complexo de superfície, com ligações de alto grau de covalência. Os constituintes da fração argila, principalmente óxidos-hidróxidos de alumínio e ferro, são os componentes do solo que mais contribuem para a adsorção de fósforo.

Como descreve Tiessen et al. (1984), com o avanço do intemperismo do solo o destino do fosfato solubilizado dos minerais primários fosfatados pode ser: a) precipitado com vários cátions, inclusive ocorrendo a neoformação de fosfatos de cálcio (BECK e SANCHES, 1994); b) adsorvido pelos grupos funcionais dos minerais secundários, formando minerais fosfatados mais estáveis termodinamicamente; ou c) incorporado a compostos orgânicos biologicamente, formando o P orgânico do solo. Com todas essas mudanças ocorridas em virtude do intemperismo, a fração sólida mineral do solo passa de fonte a dreno de P da solução (RHEINHEIMER et al., 2008).

A maioria dos autores enfatiza que a retenção de fósforo em solos ácidos está ligada, principalmente, a reações de adsorção do nutriente à fase sólida do solo. Contudo, em solos fertilizados com fosfatos solúveis granulados, mesmo em doses pequenas, há reações de precipitação em torno dos grânulos, região onde a concentração de fósforo é muito alta.

A quantificação da relação entre o fósforo na solução e aquele retido na fase sólida poder ser obtida em laboratório por meio de isotermas de adsorção. Essas relações variam com a quantidade de fósforo adicionado ao solo e com os tipos de solo, refletindo o efeito de textura e mineralogia da fração argila.

Os solos ocorrentes nas regiões tropicais e subtropicais possuem intensidade e duração de intemperismo diferentes. Todavia, a maioria dos solos presentes nos biomas tropicais e subtropicais são altamente intemperizados, como os Latossolos e os Argissolos. Estes solos compreendem cerca de  $1,7 \times 10^6$  hectares em 72 países e representam a maior porção de terra potencialmente agricultável no mundo (cerca de 49%). Somente no Brasil eles ocupam 571 milhões de hectares (67% do território) (IBSRAM, 1985 apud Von UEXKÜLL e MUTERT, 1995).

Embora existam algumas evidências de que o P ocluso, forma predominante de P nos solos tropicais e subtropicais, possa ser utilizado pelas plantas em condições de restrição de P (GATIBONI et al, 2007) ou pela redução dos complexos de óxidos de ferro com fosfato durante condições anaeróbicas (RANNO et al, 2007; GONÇALVES e MEURER et al., 2009), ele é usualmente considerado ser de limitada disponibilidade às plantas e microrganismos do solo. Dessa forma, a principal fonte de P disponível nesses solos sob vegetação natural, sem adição de fertilizantes fosfatados, passa ser o P orgânico (JOHNSON et al., 2003), num ciclo muito fechado de conservação do elemento, onde as perdas ou ganhos em curto tempo são mínimas (SOLOMON et al., 2002; REDEL et al., 2008), pois a absorção do P proveniente da decomposição da matéria orgânica ocorre tão rapidamente e perto das raízes que pouco deste pode ser absorvido pelos óxidos de ferro e alumínio (VINCENT et al, 2010).

## **2.2 Fontes de Fósforo**

A utilização de adubos fosfatados teve seu início em meados do século XIX, quando o homem percebeu que a adição de fósforo às plantas era um excelente meio para auxiliar na produção agrícola. Nessa época as principais fontes de fósforo utilizadas eram os ossos moídos, formados basicamente de fosfato de cálcio e hidroxiapatita. Com o passar dos anos os altos investimentos iniciais com a adubação fosfatada têm dificultado a exploração efetiva do potencial do solo, pois a correção da deficiência de fósforo se faz normalmente pela aplicação de fosfatos altamente solúveis, como são os superfosfatos e os fosfatos de amônio.

O fosfato de rocha é o material básico usado na fabricação de praticamente todos fertilizantes fosfatados (LOPES, 1998). Em termos mundiais mais de 99% dos fertilizantes fosfatados são produzidos a partir de reservas de rochas fosfáticas.

Uma quantidade muito pequena é fornecida na forma de escórias básicas, um subproduto da indústria do aço (LOPES et al., 2004).

O mineral predominante é a apatita. Outro mineral que ocorre, porém em menor intensidade, são as fosforitas que são fosfatos de cálcio com substituição parcial do  $\text{PO}_4^{3-}$  por  $\text{CO}_3^{2-}$ , Mg e Na (Lopes et al., 2004). A riqueza em fósforo é expressa pelo seu conteúdo porcentual de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (pentóxido de fósforo), em P elementar ou pelo equivalente em fosfato tricálcico,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  (Gervy 1970 citado por Malavolta 1981).

Quanto à origem as apatitas ocorrem por ação vulcânica ao longo de zonas de fraqueza na crosta terrestre (Lopes et al., 2004). Resultam da intrusão do magma e rochas cristalinas levando a formação de veios ou filões (Malavolta, 1981). São denominadas de origem ígnea ou metamórficas, o que é o caso típico das formações apatíticas no Brasil Central, Canadá, Rússia e África do Sul (Malavolta, 1981 e Lopes et al., 2004). Trata-se de rochas que podem conter até 37% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , apresentando teores médios entre 28% e 30% (Malavolta, 1981, Santos & Kliemann, 2006). São encontradas em terrenos muito velhos formando camadas cuja espessura atinge às vezes dezenas de metros. Segundo Malavolta (1981) sua exploração, em geral, é mais difícil que as jazidas de origem sedimentar. Santos & Kliemann, 2006, complementam que sua solubilidade em ácido cítrico a 2% é da ordem de 4% a 5%. As jazidas brasileiras (Araxá, Patos de Minas, Tapira, Catalão, Ouvidor e Jacupiranga).

Em relação às fosforitas estas se originam de depósitos sedimentares no leito dos oceanos, usualmente em áreas costeiras rasas que subsequentemente, tornaram-se solo, o que caracteriza os depósitos de rochas fosfáticas do norte da África, China, Oriente Médio e Estados Unidos (Lopes et al., 2004).

Para esta formação geológica Malavolta (1981) cita três hipóteses. A primeira considera-se que houve uma acumulação lenta de esqueletos e ossos de animais marinhos no fundo de águas calmas como as lagoas de águas costeiras, esta hipótese é sustentada pelo fato de se encontrar restos desses animais nestes depósitos. Em uma segunda hipótese a formação dos depósitos é dada pela precipitação de fosfatos no fundo de mares pouco profundos, o plâncton atuaria como acumulador de P dissolvido e, atingida uma concentração suficiente, haveria a precipitação do fosfato mineral insolúvel. A terceira e última hipótese considera que o fosfato dissolvido nas águas oceânicas se precipitaria no encontro de correntes marinhas em consequência de uma temperatura adequada e de um teor elevado de cálcio. Para tanto alguns autores consideram que para

gênese de rochas fosfáticas que predominam fosforitas ocorre uma integração destes três processos (Malavolta e Romero, 1975; Rajj et al., 1982).

O fósforo é o nutriente que apresenta maior variação quanto às fontes disponíveis no mercado. Esses produtos são classificados quanto à sua solubilidade em água, em citrato neutro de amônio (CNA) e em ácido cítrico (AC). Conhecendo-se o produto e sua solubilidade, pode-se prever sua eficiência agrônômica, ou seja, sua capacidade de fornecimento de fósforo para as culturas.

Atualmente, cerca de 85% da produção mundial de P vem de depósitos sedimentares de minas de superfície e 15% de depósitos magmáticos. Os maiores depósitos explorados localizam-se na África, Estados Unidos, China, ex-União Soviética e Oriente Médio. Quase todo fosfato de rocha é explorado por mineração superficial as chamadas lavras a céu aberto (Malavolta, 1981). Estes fosfatos contém cerca de 15% de  $P_2O_5$  e precisam ser concentrados, para serem utilizados usados como fertilizante (Lopes, 1998).

Após a retirada de blocos desagregados da rocha estes seguem para a usina de beneficiamento. Uma série de tratamentos remove a maior parte da argila e de outras impurezas elevando o teor de  $P_2O_5$  para 30% a 35%. Malavolta (1981) cita o processo de flotação como um dos mais importantes no aumento da concentração do P na rocha. Após o beneficiamento, o fosfato de rocha é finamente moído, e já constituem os chamados fosfatos naturais ou fosfatos naturais reativos (Phillips & Webb, 1971 citado por Malavolta, 1981, Furtini Neto et al., 2001). A maior parte deste material é tratado para tornar o fósforo mais solúvel, via de regra os fertilizantes fosfatados são classificados em tratados com ácidos ou processados termicamente.

O fósforo tratado com ácidos é sem dúvida o mais importante. De forma geral a partir do tratamento da rocha com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) é produzido o ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ), ácido fluorídrico (HF) e gesso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), para esse processo é dado o nome de obtenção de ácido fosfórico por via úmida. A partir de então através de processos de purificações e reações são produzidos os mais diferentes fertilizantes minerais fosfatados tratados com ácido (Phillips & Webb, 1971 citado por Malavolta 1981; Novais et al., 2007).

O processamento via seca é empregado para produção de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) destinado a indústria química e farmacêutica. O  $H_3PO_4$  fabricado por via úmida mediante a eliminação da água dá origem ao ácido superfosfórico, um composto

mais concentrado, de forma líquida quando em temperatura ambiente, amplamente utilizado em adubos líquidos (Malavolta, 1981).

O tratamento térmico de fosfatos naturais procura desfazer a rigidez estrutural da apatita tornando mais solúvel o seu fósforo (Malavolta, 1981). São produzidas através do aquecimento do fosfato de rocha a várias temperaturas, com ou sem aditivo. Nos Estados Unidos ocupam uma parte muito pequena na produção de fosfato. Elas são, em geral, mais caras do que os fosfatos tratados com ácidos e não permitem a amonificação. Assim sendo, estas fontes não têm valor na fabricação de fertilizantes N-P-K. No Brasil, estes fertilizantes são conhecidos como termofosfatos (Lopes, 1998).

Os superfosfatos simples e triplos, ambos fosfatos monocálcicos, bem como os fosfatos monoamônico (MAP) e diamônico (DAP) tem mais de 90% do fósforo total solúvel em CNA + água e são equivalentes quanto à sua capacidade de fornecimento de fósforo para as plantas. São produtos de reconhecida e elevada eficiência agrônômica, para quaisquer condições de solo e de cultura, correspondendo a 95% do  $P_2O_5$  utilizado na agricultura brasileira (51% como superfosfatos simples e triplo e 44% como MAP e DAP).

No caso dos superfosfatos, a matéria-prima básica é a rocha fosfática, que, quando atacada por ácido sulfúrico, dá origem ao superfosfato simples, e atacada por ácido fosfórico origina o superfosfato triplo. No caso dos fosfatos amoniados, a matéria-prima básica é o ácido fosfórico, que, reagindo com amônia ( $NH_3$ ) em concentração calculada, origina o fosfato mono ou diamônico. É importante notar que o ácido fosfórico é obtido pelo ataque da rocha fosfática por ácido sulfúrico, nesse caso utilizado em concentração superior àquela empregada na produção do superfosfato simples.

Quando no processo de produção dos fertilizantes fosfatados totalmente acidulados se utilizam rochas fosfáticas ou concentrados apatíticos (produto do processo de beneficiamento de rochas que contêm impurezas) de elevada qualidade, são obtidos fertilizantes formados praticamente pelos compostos de interesse da indústria. Nesse caso, os superfosfatos simples e triplos irão conter basicamente fosfato monocálcico monoidratado ( $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ ), e os fosfatos mono ( $NH_4H_2PO_4$ ) e diamônico ( $(NH_4)_2HPO_4$ ) serão os constituintes fundamentais dos fertilizantes MAP e DAP, respectivamente.

A obtenção de fertilizantes "puros" traz, como consequência, produtos de elevada solubilidade em água e citrato neutro de amônio + água (CNA + H<sub>2</sub>O; extrator utilizado para avaliar a disponibilidade de P nos fertilizantes fosfatados totalmente acidulados). Os compostos citados como pertencentes aos fertilizantes produzidos a partir de material de elevada qualidade são tidos como prontos fornecedores de P às culturas. Ao contrário, quando são utilizados no processo de produção dos fertilizantes fosfatados totalmente acidulados rochas ou concentrados apatíticos de baixa pureza (presença significativa de impurezas catiônicas, tais como Fe e Al), compostos outros podem ser formados em adição àqueles já citados. Outros compostos podem ainda ser formados quando da produção de superfosfato triplo ou fosfatos amoniados, pelo emprego de ácido fosfórico que contenha impurezas catiônicas. Esses compostos são genericamente citados como do tipo Fe-Al-P e NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Fe-Al-P, para os superfosfatos e fosfatos amoniados, respectivamente, e apresentam normalmente baixa solubilidade em água, podendo ou não ser solúveis em CNA + H<sub>2</sub>O.

Outros produtos, como termofosfatos, fosfatos naturais brasileiros e fosfatos naturais reativos, correspondem a 5% do P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> utilizado como fonte de fósforo no Brasil. Os termofosfatos apresentam mais de 90% do fósforo total solúvel em AC e, na forma de pó, apresentam índice de eficiência agrônômica equivalente aos fosfatos solúveis em água. Os termofosfatos são obtidos por tratamento térmico de rochas fosfatadas em mistura com silicatos. No processo de fusão podem ainda ser misturados fontes de micronutrientes, obtendo-se, neste caso, um fertilizante enriquecido (Furtini Neto et al. 2001).

Os fosfatos naturais brasileiros (Araxá, Patos de Minas, Catalão e outros) apresentam baixa solubilidade em água e AC, sendo sua dissolução no solo muito lenta, principalmente em condições de acidez corrigida para culturas anuais, com pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ao redor de 6,0. Consequentemente, sua eficiência agrônômica é muito baixa para culturas anuais, em relação aos fosfatos solúveis em água, nos primeiros anos após sua aplicação. Para pastagens, que são espécies perenes, sua eficiência é baixa no primeiro ano, evoluindo nos anos subsequentes.

Os fosfatos naturais reativos, como Gafsa, Carolina do Norte, Arad, Argélia, Daoui e Marrocos, comercializados no Brasil na forma farelada, apresentam índice de eficiência agrônômica (IEA – calculado por meio da produtividade) médio para culturas anuais no primeiro cultivo por volta de 50%, evoluindo nos anos

seguintes para aproximadamente 100% quando comparados ao superfosfato triplo. Para pastagens, esses fosfatos tem apresentado eficiência agronômica inicial superior à obtida com culturas anuais (Souza et al., 1999).

Como o desempenho dos fosfatos naturais reativos aumenta com o passar do tempo, sendo seu efeito residual equivalente ou mesmo um pouco superior ao dos superfosfatos, estas fontes constituem opção para o agricultor como adubação corretiva (SOUZA; REIN; LOBATO, 2008).

### **2.3 Capacidade de fixação do fósforo em solos tropicais**

O principal fator que reduz a disponibilidade do P aplicado no solo para as plantas é a sua fixação no solo pelo fenômeno da adsorção. De acordo com Lopes e Cox (1979), o processo de adsorção do P pelos óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio é o principal fator envolvido na fixação do P, mas, do ponto de vista agronômico prático, a percentagem de argila dos solos é a variável mais adequada para estimar a capacidade de fixação de P e/ou sua CTP. Os níveis críticos no solo variam em conformidade com a capacidade tampão de fosfato (CTP) do solo ou seu teor de argila, um estimador prático dessa CTP. Isto é particularmente verdadeiro quando se usa extratores de P sensível a CTP do solo, como o Mehlich-1 (ALVAREZ V., 1999) e pouco aplicável com o uso da resina de troca aniônica (RAIJ et al., 1996; SILVA, 1999). Assim, Sousa e Lobato (2003) têm estabelecido faixas de interpretação da fertilidade do solo baseado nos teores de argila dos solos.

Os solos tropicais se caracterizam pelo elevado do grau de intemperismo e pelos baixos teores de fósforo na forma disponível as plantas (Bonser et al., 1996; Rocha et al., 2005). Nesses solos o fósforo é o nutriente mais limitante para a produção agrícola (LÓPEZ-BÚCIO et al., 2000). Por apresentar baixa mobilidade no solo (MARSCHNER, 2002; Costa et al., 2009), o fósforo é, frequentemente, o fator que restringe o crescimento de plantas (HINSINGER, 2001).

Outro ponto a ser considerado quando da aplicação de P é o fator capacidade. O fator capacidade de fósforo é definido pela razão de equilíbrio entre a quantidade de P e o P na solução do solo e representa uma medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P em solução. As características e o teor dos constituintes minerais da fração argila são responsáveis pela velocidade do processo de passagem do P lábil para o P não-lábil (GONÇALVES et al., 1989).

De modo geral, alguns minerais encontrados em abundância nesses solos são: caulinita, gibbsita, hematita, goethita e maghemita (Costa et al., 1999). Trabalhos mostram que a adsorção de P – termo genérico para todo processo que resulta na retenção do elemento (Novais et al., 2007) – acontece de forma mais intensa nesses solos (Novais & Smyth, 1999). Outros estudos realizados com intuito de avaliar essa relação mostram que isso se deve à formação de complexos de superfície de esfera interna do ânion fosfato com os minerais desses solos (Sposito, 1989; Ranno et al., 2007). Uma das características usadas para avaliar o grau de interação do P com os sólidos do solo é a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), a qual pode ser calculada, entre outras, pela isoterma de Langmuir (Olsen & Watanabe, 1957). Segundo Alvarez V. et al. (2000), outro atributo que pode medir a atividade sortiva dos solos é o P remanescente (P-rem), que também pode ser utilizado como estimador da CMAP.

Sanchez & Uehara (1980) definem os solos de elevada capacidade de fixação de fósforo como aqueles que precisam de aplicações acima de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de P para manter um equilíbrio na solução de  $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$  de P. É importante lembrar que nem todos os solos apresentam elevada capacidade de fixação de fósforo. Isto se deve principalmente às variações entre os solos no que diz respeito ao teor e tipo de argila e conteúdo de óxidos de ferro e alumínio livre. Assim, solos com textura arenosa podem não apresentar elevada capacidade de fixação de fósforo, da mesma forma que solos com elevado teor de argila, associado a um baixo teor de óxidos de ferro e alumínio. Nos solos da região tropical, é importante determinar a capacidade de fixação de fósforo, pois é um dos fatores que governa a disponibilidade do elemento na solução do solo, a dissolução de fertilizantes e, conseqüentemente, a absorção pelas culturas (Sanchez & Uehara, 1980).

No caso do Brasil, alguns solos do cerrado podem fixar até  $4.000 \text{ kg ha}^{-1}$  de P (Ker, 1995). No caso do estado de São Paulo, Rodrigues (1980), em estudo com 100 solos, determinou que a fixação de fósforo pode chegar até 72% da quantidade de fertilizante aplicado. O principal fator responsável pela fixação de fosfato nos solos paulistas é o conteúdo de óxidos de ferro e alumínio (MELLO, 1968).

O teor e a constituição mineralógica da fração argila assumem papel importante na caracterização de um solo como dreno (característica de adsorção de P) ou fonte (apresenta-se com reservas favoráveis à planta). Desta forma, solos muito intemperizados com elevado teor de argila, predominância de minerais de argilas silicatadas do tipo 1:1 (caulinita) e elevados teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al

exercerão predominantemente a função de drenos, enquanto aqueles poucos intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) exercerão papel de fontes (NOVAIS; SMITH, 1999).

A compreensão dos mecanismos que influem na fixação de fósforo nos solos é fundamental no sentido de se manejar corretamente as diferentes opções de fertilizantes contendo P. Alguns resultados experimentais indicam que fontes de P com baixa solubilidade em água foram mais eficientes que fontes de elevada solubilidade em água em solos de elevada capacidade de fixação de P (MCLEAN; BALAM, 1967; MCLEAN; LOGAN, 1970).

Devido ao comportamento do P no solo, apresentando baixos teores na solução do solo, principalmente nos solos mais intemperizados é indispensável a reposição deste para a absorção do mineral pelos vegetais, tornando as características intrínsecas do solo um fator que influencia na recomendação da adubação fosfatada.

#### **2.4 Eficiência agrônômica dos fertilizantes fosfatados**

A característica que melhor avalia uma fonte de fósforo, do ponto de vista agrônômico, é a sua eficiência em fornecer o nutriente para as plantas, ou seja, sua capacidade de provocar o maior acréscimo de rendimento por unidade de P aplicado (Goedert e Sousa, 1984). Pelo fato de o efeito dos fertilizantes ser dependente de fatores pedológicos e climáticos, do tipo de manejo e do ecossistema solo-planta, a eficiência agrônômica dos fosfatos é, em geral, calculada pela comparação com uma fonte de referência (Morel & Fardeau, 1990), como os superfosfatos simples e triplo (Raij, 1986).

No Brasil, as pesquisas com avaliação agrônômica de fontes de fósforo aumentaram consideravelmente a partir do início da década de setenta, em face da elevação dos preços dos fertilizantes fosfatados solúveis e da dependência do País de seu suprimento do exterior (Braga et al., 1980, e Defilippe, 1990). Desde essa época, a procura por fontes alternativas de fertilizantes fosfatados tem sido uma preocupação constante (Nogueira, 1990).

O emprego na agricultura dos fertilizantes de baixa solubilidade em água tem sido uma alternativa para os agricultores em função do menor custo dessa fonte (BRASIL, 2004). A utilização dos fosfatos naturais como fonte de fósforo é uma prática que vem sendo empregada em vários países, sendo que no Brasil o uso de fosfatos naturais aumentou significativamente a partir da década de 60. No entanto, a aplicação

direta dos fosfatos naturais ainda é bastante reduzida em relação às fontes de elevada solubilidade.

A avaliação de uma fonte de fósforo com extratores tem como objetivo determinar o potencial agronômico dos fertilizantes. A solubilidade das fontes em extratores químicos exprime seu significado quando correlacionada com a eficiência agronômica. Porém, essas metodologias não consideram a eficiência agronômica de forma direta, nem as formas do fósforo no fertilizante (ALCARDE e PROCHNOW, 2003).

A eficiência agronômica de fontes fosfáticas segundo Chien & Menon (1995), é afetada pelo tipo da fonte, propriedades do solo, práticas de manejo e a espécie vegetal. Para Novais & Smyth (1999) a solubilização de fosfatos é principalmente função das propriedades do solo (acidez e dreno) e da planta, e para Khasawneh & Doll (1978), os fatores que afetam a eficiência agronômica são: a reatividade da fonte, tamanho de partículas, pH do solo, teor de cálcio e fósforo, textura, eficiência de absorção pelas plantas e o teor de matéria orgânica.

Prochnow, Alcarde e Chien (2003) relatam que a maior parte das pesquisas tem se concentrado na purificação da rocha fosfórica e na opinião desses deve-se investir de forma decisiva em pesquisa para o desenvolvimento de novos produtos, já que as indústrias brasileiras têm optado por processos industriais onerosos para eliminar os contaminantes.

Para contornar o problema dos custos dos fosfatos solúveis obtidos pelos processos convencionais de solubilização, além da questão de fixação do nutriente pelo solo, vem sendo proposto o uso de fontes alternativas de fósforo, como os fosfatos parcialmente acidulados, os fosfatos de fusão (termofosfatos) e os fosfatos naturais (REDDY et al., 1999; KLIEMANN; LANA et al., 2004), dentre outras como resíduos da própria fabricação destes fertilizantes que ainda contém P em sua composição.

Assim, sugere-se que fontes fosfatadas de elevada solubilidade em água sejam usadas em solos com baixa à moderada capacidade de fixação de P, em culturas de ciclo curto e solos com pH elevado, ou seja, que foram corrigidos pela calagem. Em solos ácidos, que fixam grandes quantidades de P, a aplicação de fontes de P menos solúveis pode ser mais eficiente e econômica em relação às fontes de elevada solubilidade. A mistura desses dois tipos de fontes de fósforo pode ser uma alternativa viável. Desde modo, faz-se necessária a otimização das reservas fosfáticas, um recurso natural escasso, finito e sem sucedâneo. Uma forma de melhor aproveitar as reservas é o

uso de materiais fosfáticos considerados marginais para a produção de fertilizantes acidulados. Porém, uma desvantagem deste processo é a presença de impurezas insolúveis no produto final, mesmo após a acidulação (FRAZIER; LEHR, 1967). Como a solubilidade é um dos mais importantes fatores relacionados à eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados, este fato precisa ser criteriosamente avaliado.

### 3. REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J.C.; PROCHNOW, L.I. Metodologias de extração para avaliar a eficiência de fertilizantes (compact disc). In: SIMPÓSIO DE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., São Pedro, 2003. **Anais**. São Pedro: POTAFOS; ANDA, 2003.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo, 25:27-32, 2000.
- ALVAREZ, V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- BECK, M. A.; SANCHEZ, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1424- 1431, 1994.
- BONSER, A. M.; LYCH, J. P.; SIEGLINDE, S. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. **New Phytologist**, v.132, p.281-288, 1996.
- BRAGA, J.M.; MASCARENHAS, H.A.A.; FEITOSA, C.T.; HIROCE, R. & RAIJ, B. van. Efeitos de fosfatos sobre o crescimento e produção de soja. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 4:36-39, 1980.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção mineral. **Balanço mineral brasileiro 2001**. [http://www.dnpm.gov.br/dnpm.\\_legis/Balanço01.pdf](http://www.dnpm.gov.br/dnpm._legis/Balanço01.pdf) (25 jun. 2004b).
- CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, v.41, n.2, p.227-234, 1995.
- COSTA, A.C.S.; BIGHAM, J.M.; RHOTON, F.E. & TRAINA, S.J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays Clay Miner.**, 47:466-473, 1999.
- COSTA, J. P. V.; BASTOS, A. L.; REIS, L. S.; MARTINS, G. O.; SANTOS, A. F. Difusão de fósforo em solos de Alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade. **Revista Caatinga**, v.22, n.3, p.229-235, 2009.
- CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, v.64, p.197-214, 1995.

- DEFILIPPE, G. Panorama da rocha fosfática e ácido fosfórico. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 5., São Paulo, 1990. **Anais**. São Paulo, IBRAFOS, s.d. p.5-9.
- FRAZIER, A.W.; LEHR, J.R. Iron and aluminum compounds in commercial superphosphates. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 15, n. 2, p. 348- 349, 1967.
- FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G.A.A. **Fertilidade do solo**. 2001. 252f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Solos e Meio Ambiente) – Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- GATIBONI, L.C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.4, p.691-699, 2007.
- GOEDERT, W.J. & SOUSA, D.M.G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Brasília, 1984. p.255-290.
- 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**, v. 33, p. 357-362, 2009.
- GONÇALVES, J.L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; RIBEIRO, A.C. Cinética de transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.13-24, 1989.
- HINSINGER, P. Biology availability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. **Plant and Soil**, v.237, p.173-195, 2001.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho de partícula. **Ciência Rural**, v.33, p.41-47, 2003.
- IBSRAM. **Acid Tropical Soils Management Network**. International Board of Soil Research and Management, Bangkok, Tailândia, 1985.
- JOHNSON, A. H.; FRIZANO, J.; VANN, D. R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure, **Oecologia** v. 499, p.135-487, 2003.
- KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, v.30, p.159-206, 1978.
- KLIEMANN, H.J.; LIMA, D.V. Eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 111-119, 2001.
- KER, J.C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 181 p. (Tese de Doutorado).

LANA, R.M.Q.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; LUZ, J.M.Q.; SILVA, J.C. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 525-528, 2004.

LOPES, A.S. (Tradução e Adaptação). **Manual internacional de fertilidade do solo**, 2a edição revisada e ampliada. Piracicaba: POTAFOS, 1998, 177p.

LÓPEZ-BUCIO, J. L.; M. DE LA VEJA, O.M. de la; Guevara-García, A.; Herrera-Estrella L. Enhance phosphorus uptake in transgenic tobacco plants that overproduce citrate. **Natural Biotechnology**, v.18, p.450-453, 2000.

LOPES, S. S.; SILVA, C. A. P.; BASTOS, A. R. R. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: YAMADA, T.; ADDALLA, S. R. S. SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 2004, Piracicaba. **Anais...**Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 13-34.

MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola: adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 596p. 1981.

MALAVOLTA, E; ROMERO J.P. 1975. **Manual de adubação**. 2 ed. São Paulo-SP: ANDA, p.193- 200.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 2002. 889p.

McLEAN, E.O.; BALAM, B.S. Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. III. Uptake by corn from soils of different calcium status. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 31, p. 811-814, 1967.

McLEAN, E.O.; LOGAN, T.J. Sources of phosphorus for plants grown in soils of differing phosphorus fixation tendencies. **Soil Science Society of America Proceedings**, Morgantown, v. 34, p. 907-911, 1970.

MELLO, F.A.F. Capacidade de fixação de fosfato de alguns solos do município de Piracicaba. **Revista de Agricultura**, v.43, p.23-27, 1968.

MOREL, C. & FARDEAU, J.C. Agronomical evaluation of phosphate fertilizer as a nutrient source of phosphorus for crops: isotopic procedure. **Fert. Res.**, Dordrecht, 24:115-122, 1990.

MULLINS, G.L., SIKORA, F.J., BARTOS, J.M.; BRYANT, H.H. Plant availability of phosphorus in the water-insoluble fraction of commercial triple superphosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n.5, p.1469-1472, 1990.

NOGUEIRA, A.V. **Eficiência agrônômica, como fertilizante, de um lodo de esgoto e de dois resíduos provenientes da indústria siderúrgica**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1990. 85p. (Dissertação de Mestrado).

NOVAIS, R.F.; SMYTH, J.T. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. & NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.276-374.

OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 21:144- 149, 1957.

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.

PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: SIMPÓSIO FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 726p.

RAIJ, B. van. Condições mínimas de eficiência para fosfatos alternativos ao superfosfato. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 10:235-239, 1986.

RAIJ, B. van et al. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. Boletim Técnico do Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, n. 100, 1996. 285 p.

RAIJ, B. VAN; CANTARELLA, H.; CAMARGO, A.P. DE e SOARES, E. (1982). Perdas de cálcio e magnésio durante cinco anos em ensaio de calagem. *Rev. bras. Ci. Solo*, 6:33-37.

RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; MALLMANN, F. J. K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzeas do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociências**, v. 13, p. 47- 54, 2007.

REDEL, Y. D.; RUBIO, R.; BORIE, F. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. **Geoderma**, v. 145, p. 216–221, 2008.

REDDY, D.D.; RAO, A.S.; REDDY, K.S.; TAKKAR, P.N. Yield sustainability and phosphorus utilization in soybean-wheat system on Vertisols in response to integrated use of manure and fertilizer phosphorus. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 62, p. 181-190, 1999.

RHEINHEIMER, D. S. et al. **Fósforo orgânico do solo**. In: SANTOS, G. A. (Ed.) et al. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas Tropicais e Subtropicais**. 2.ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metropole, p. 139-157, 2008.

ROCHA, A. T.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO, M. R. Fracionamento de fósforo e avaliação de extratores de P-disponível em solos da ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.178-184, 2005.

RODRIGUES, M.R. **Fatores que afetam a fixação de fosfatos nos solos do estado de São Paulo**. Piracicaba, 1980. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ROSEMARIN, A.; BRUIJNE, I.; CALDWELL, I. **The Next Inconvenient Truth – Peak Phosphorus**. The Broker, Stocolmo, v. 3, n. 15, p. 6-9, 2009.

SANCHEZ, P. A.; UHERA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1980. chap. 17, p. 471-514.

SANTOS, E. A.; KLIEMANN, H. J. Eficiência de fosfatos naturais relacionada à produtividade de milho em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 2, p. 75-81, 2006.

SILVA, R. C., 2013. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2013.

SILVA, N. M. da. Nutrição mineral e adubação do algodoeiro no Brasil. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos (Eds.). **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. p. 57-92.

SOLOMON, D. et al. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands, **Geoderma**, v. 105, p. 21–48, 2002.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 102, 2003. 16 p. Encarte técnico.

SOUSA, D.M.G., REIN, T.A. & LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de Cerrado. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., Brasília, 2008. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais: **Anais**. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2008.

SOUSA, D.M.G. de; REIN, T.A.; LOBATO, E. Eficiência agrônômica do fosfato natural de Gafsa em um Latossolo de Cerrado com a cultura da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., Brasília, DF, 1999. **Anais...** Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. 277p.

STEWART, W.M.; DIBB, D.W.; JOHNSTON, A.E.; SMYTH, T.J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n.1, p. 1–6, 2005.

TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 48, p. 853- 858, 1984.

VINCENT, A. G.; TURNERB, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist Forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 48–57, 2010.

Von UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Rehabilitation of Anthropic Savanna. In: TIESSEN, H (Ed). **Phosphorus in the global environmental: transfers, cycles and management**. 1. ed. Chichester, U.K: Wiley, p. 149-154, 1995.

WALKER, T.W.; SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p.01-19, 1976.

## CAPÍTULO I – “FERTILIDADE DO SOLO E RESPOSTA DE POTENCIAIS FERTILIZANTES FOSFATADOS NO CRESCIMENTO DO MILHO”

### RESUMO

Atualmente as principais fontes de P utilizadas na agricultura, são obtidas industrialmente pelo tratamento de rochas fosfáticas com ácidos, o que eleva os custos destes fertilizantes. O uso de fontes não tradicionais como rejeitos da mineração ou fosfatos naturais, tem se tornado nova alternativa de se buscar fertilizantes eficientes, cujo o custo seja inferior. Contudo, partindo do princípio que fontes alternativas podem ser utilizadas como fertilizantes, este trabalho teve como objetivo analisar a eficiência agrônômica de fontes de fósforo não convencionais em solos com condições distintas de fertilidade em cultura exigente e de ciclo curto como o milho. Para tanto, foi utilizado solo LATOSSOLO Vermelho distrófico em duas condições, onde na primeira situação o solo encontrava-se com altos teores de P e baixa capacidade de adsorção de P na segunda situação o solo possuía níveis extremamente baixos do elemento e com alta CMAP. Em seguida, foi realizada a calagem e após 30 dias adicionados os fertilizantes fosfatados em quatro doses: 0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P. Foram utilizados o superfosfato triplo (SFT) como fosfato de referência, um fosfato natural reativo (FNR) e dois produtos provenientes das lagoas de rejeitos da própria produção de fertilizantes, denominados como fosfato precipitado 1 (FP1) e fosfato precipitado 2 (PP2). As plantas foram colhidas aos 55 DAE e o índice de eficiência agrônômica foi calculado com base no diferencial de produção obtido entre os fosfatos em teste e o superfosfato triplo. 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. Os efeitos das doses de P foram testados por meio de equações de regressão. Os resultados evidenciam que a fonte FP1 foi a fonte alternativa que proporcionou produções de massa de matéria seca e maior acúmulo de macronutrientes na planta, equivalentes aos proporcionados pelo SFT, quando foi utilizada a maior dose de P no solo, além de ser superior às demais fontes testadas. Neste caso, pode-se inferir que esta fonte pode ser utilizada em cultivos de plantas de ciclo curto como é o caso do milho. A fonte FP1 pode ser utilizada com alta eficiência tanto em solo com fertilidade do solo constituída, como em solos com deficiência severa de P e com diferentes capacidades de adsorção de P. O FNR não é recomendado para cultivos de plantas de ciclo curto, mesmo que o solo já apresente teores iniciais de P alto. A fonte FP2 também não foi eficiente em ambos os solos estudados, demonstrando ter eficiência agrônômica inferior a 50% quando comparada a um fosfato acidulado, não sendo recomendado seu uso em cultivos com plantas de ciclo curto.

**Palavras chaves:** fontes alternativas de P, eficiência agrônômica de fertilizantes, rochas fosfáticas.

## CHAPTER I - "SOIL FERTILITY AND RESPONSE OF POTENTIAL FERTILIZERS PHOSPHATE IN CORN GROWTH "

### ABSTRACT

Currently the main sources of P used in agriculture are obtained industrially by treating phosphate rock with acids, which increases the costs of these fertilizers. The use of non-traditional sources such as mining tailings or rock phosphates, has become new alternative to seek efficient fertilizers, whose cost is lower. However, assuming that alternative sources can be used as fertilizer, this study aimed to analyze the agronomic efficiency of unconventional sources of phosphorus in soils with different conditions of fertility demanding culture and short cycle as corn. Therefore, we used Dystrophic Red dystrophic soil in two conditions, where the first situation the soil found with high levels of P and low P adsorption capacity in the second situation the soil had extremely low levels of the element and high CMAP. Then, liming and after 30 days added phosphate fertilizers in four doses was performed: 0, 40, 80 and 120 mg dm<sup>-3</sup> of P. We used triple superphosphate (TSP) as a reference phosphate, a reactive phosphate (FNR) and two products from the tailings ponds of own production of fertilizers, referred to as precipitated phosphate 1 (FP1) and precipitated phosphate 2 (PP2). Plants were harvested at 55 DAE and the agronomic efficiency was calculated based on the differential output obtained from phosphates test and triple superphosphate. Data were submitted to analysis of variance and the means compared by Tukey test at 5% probability, with the aid of SISVAR program. The effects of P doses were tested by regression equations. The results show that the FP1 source was the alternative source that provided mass of dry matter production and greater accumulation of nutrients in the plant, equivalent to those provided by the SFT, when we used the highest dose of P in the soil as well as being superior to others tested sources. In this case, it can be inferred that this unit can be used in crop short cycle plants such as maize. The FP1 source can be used with high efficiency in both soil with soil fertility constituted, as in severe deficiency with soil P and P with different adsorption capacities The FNR is not suitable for short cycle crop plants, even the soil already present initial concentration of P high. The FP2 source was also not efficient in both soils, demonstrating having agronomic efficiency less than 50% when compared to an acidulated phosphate, is not recommended its use in crops with short cycle plants.

**Key words:** alternative sources of P, agronomic efficiency of fertilizers, phosphatic rocks.

#### 4. INTRODUÇÃO

As projeções do agronegócio brasileiro apontam para um crescimento da área plantada, da produção e da produtividade. Entretanto, existem fatores críticos capazes de afetar a competitividade das commodities agrícolas brasileiras no mercado internacional. Os fertilizantes podem ser considerados de maior relevância por serem insumos necessários à produção e que vem sofrendo aumento no preço afetando o custo de produção. De acordo com a Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes (IFA, 2008), os maiores consumidores desses fertilizantes minerais no mundo são: a China (30%), a Índia (13%), os Estados Unidos (12%) e o Brasil na quarta posição consumindo 6% de todo o fertilizante utilizado no mundo. A produção nacional atende somente a 2% da produção mundial, ou seja, temos que importar mais de dois terços de nossas necessidades de fertilizantes minerais.

Em relação aos fosfatos, um dos bens minerais que movimenta maior volume de rochas/minério, verifica-se que o Brasil continua a depender fortemente de importações. Só para os fosfatos, as compras no exterior, em 2006, atingiram o valor de 912 milhões de dólares. Observa-se assim que o tímido desenvolvimento da indústria nacional de fertilizantes não acompanha o dinamismo da agropecuária.

O fósforo é um mineral essencial para a agricultura brasileira, uma vez que nossos solos são carentes deste nutriente. O aporte de fertilizantes de alta solubilidade garante a quantidade necessária de nutrientes nos solos, mas não é garantia de que as plantas sejam nutridas com quantidades suficientes para o seu bom desenvolvimento. O modelo de fertilização implantado no Brasil é baseado em produtos de alta solubilidade, como aqueles adotados em países de clima temperado, modelo importado que não atende às peculiaridades de nossos solos (CHAVES e OBA, 2004).

As fontes solúveis em água mais produzidas no Brasil são os superfosfatos (simples e triplo) e os fosfatos de amônio (MAP e DAP). Trata-se de produtos solúveis quando incorporados ao solo, com alta capacidade de liberar fósforo para as plantas e, portanto, com alta eficiência agrônômica como fertilizantes fosfatados. A principal característica desses fertilizantes fosfatados é a elevada solubilidade em água, porém apresentam limitações econômicas e industriais, como a necessidade de enxofre para ser utilizado na acidulação, que é importado, e de concentrados fosfáticos como matéria-prima, com elevado teor de  $P_2O_5$  e baixo conteúdo de impurezas. Os fosfatos de amônio são igualmente eficientes, mas também necessitam de enxofre para sua fabricação.

Contudo, são excelentes fontes do ponto de vista agrônomo, tendo algumas limitações, ou seja, tecnologia relativamente complexa o que torna essas fontes relativamente mais caras para o produtor rural.

Mesmo em solos com alta capacidade de fixação, como é o caso dos solos tropicais, fontes pouco solúveis de P podem ser viáveis sob o ponto de vista agrônomo e econômico (PROCHNOW et al., 2006). Goedert e Souza (1984) relatam que as fontes mais eficientes inicialmente são os fosfatos solúveis, mas fosfatos naturais possuem efeito similar aos solúveis, devido ao aumento da solubilidade após alguns anos da aplicação, tornando-se uma opção mais econômica para o produtor.

Todavia a produção de fertilizantes fosfatados gera muito rejeitos, materiais relativamente ricos em fósforo, possibilitando sua utilização na agricultura. Além disso há a necessidade de conservação do meio ambiente e a busca de uma produção agrícola sustentável, já que esses rejeitos tornam-se um problema ambiental grave, caso não tenham destino. Contudo, partindo do princípio que fontes alternativas de fosfato, como fosfato natural e rejeitos da indústria podem ser utilizados como fertilizantes, este trabalho teve como objetivo analisar a eficiência agrônoma de fontes de fósforo não convencionais em solos com condições distintas de fertilidade em uma cultura anual como o milho.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Solo utilizado e condução do experimento**

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP, no município de Botucatu/SP, durante os meses de setembro a outubro de 2013. Utilizaram-se amostras de solo LATOSSOLO Vermelho distrófico em condições distintas, coletadas na profundidade de 0-20 cm. Na primeira situação o solo permanecia em pousio a três anos consecutivos e havia sido cultivado com soja. Nesta área foi coletado amostras de solo que apresentavam  $30 \text{ mg dm}^{-3}$  de P. Na segunda situação o solo também permanecia em pousio a três anos, porém, nesta área, o solo havia sido cultivado com Eucalipto e as amostras de solo continham  $3 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (Tabela 1).

Tabela 1. Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento analisados de 0 a 20 cm de profundidade.

Solos	Atributos químicos										Análise granulométrica			
	pH CaCl <sub>2</sub>	M.O. g dm <sup>-3</sup>	P <sub>resina</sub> mg dm <sup>-3</sup>	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Areia	Argila	Silte	Textura
				-----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						(%)	(g kg <sup>-1</sup> )			
LVd <sub>1</sub>	3,9	18	30	69	3,3	2	2	8	77	10	630	307	63	Média
LVd <sub>2</sub>	4,0	33	3	76	2,1	7	3	12	89	14	360	510	130	Argilosa

Aplicou-se calcário dolomítico (PRNT: 98 %) para elevar a saturação por bases a 70 % (Raij et al., 1997). Posteriormente, o solo foi umedecido à capacidade de campo e acondicionado em sacos plásticos por 30 dias para a reação do corretivo. Em seguida, o solo foi seco ao ar novamente e adicionados os fertilizantes fosfatados, que foram misturados à massa de solo e retornados ao vaso em quatro doses: 0, 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, 120 mg dm<sup>-3</sup> de K, 60 mg dm<sup>-3</sup> de N parcelados em duas aplicações aos 15 e aos 30 dias após a emergência e 2 g por vaso de óxidos silicatados como fonte de micronutrientes. Foram utilizados o superfosfato triplo como fosfato de referência, um fosfato natural reativo, de origem sedimentar e orgânico, formado pela deposição e posterior decomposição de restos de animais marinhos, sendo proveniente da região do Peru. Dois produtos provenientes das lagoas de rejeitos da própria produção de fertilizantes, denominados como fosfato precipitado 1 (FP1) e fosfato precipitado 2 (FP2) (Tabela 2 e 3).

Tabela 2. Características químicas dos materiais fosfatados

Amostras	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -T	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -AC	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -CNA	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Ag	K <sub>2</sub> O	S-SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	----- % -----												
FP1	9,10	2,62	3,53	0,00	0,00	3,60	24,76	0,23	0,00	1,05	0,03	0,05	0,08
FP2	14,40	5,97	11,68	0,00	0,00	2,50	15,00	0,34	0,01	3,29	0,08	0,08	0,07
Fosfato reativo	29,40	6,87	5,77	0,00	0,04	2,36	32,60	0,33	0,02	0,39	0,00	0,06	0,09
Super Triplo	48,08	17,04	45,07	37,34	0,00	4,40	13,10	0,26	0,02	1,79	0,07	0,08	0,02

T – Total; AC – Ácido Cítrico a 2% Rel-1:100; CNA - Citrato neutro de amônio+água; Ag – água

Tabela 3. Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas (%) .

Fontes <sup>(1)</sup>	Material passante na peneira de 4 mm <sup>(2)</sup>	Material passante na peneira de 1 mm <sup>(3)</sup>
FP1	100	99,26
FP2	88,43	58,17
FNR	100	99
SFT	74,63	6,35

<sup>(1)</sup>FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FNR: Fosfato Reativo e SFT: Super Fosfato Triplo. <sup>(2)</sup>ABNT 5; <sup>(3)</sup>ABNT 18.

Foram semeadas 5 sementes do híbrido de milho 2B810 PW por vaso e quinze dias após a emergência foi realizado o desbaste deixando-se duas plantas por

vaso durante 55 dias, quando se realizou a colheita. Durante o crescimento da cultura, irrigações diárias foram realizadas, baseados em dados de tanque classe A e evapotranspiração da cultura, mantendo a umidade do solo a 70% da capacidade máxima de retenção de água.

## 5.2 Delineamento experimental e avaliações

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os tratamentos dispostos em esquema fatorial 4x4, constituídos por quatro doses e quatro fontes de fósforo, aplicados em solos com fertilidade distintas, totalizando 128 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de um vaso plástico contendo 19 dm<sup>3</sup> de solo e duas plantas de milho (Figura 1).



Figura 1 – Visão geral das plantas de milho aos 15 e 55 dias após a emergência.

Aos 55 dias após a emergência do milho, antes da colheita, foram determinados o diâmetro do colmo, medido na altura de 1 cm do solo com o auxílio de um paquímetro digital e a altura das plantas medidas com uma régua milimetrada. Em seguida foi efetuado o corte da parte aérea das plantas de cada vaso a 1 cm do solo. O material vegetal foi conduzido ao laboratório onde foi lavado em água corrente, e, posteriormente, com água destilada. Após a lavagem o material vegetal foi seco em estufa com circulação de ar forçada a 65 °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 Bataglia et al., (1983). Com os dados do teor

de P, e a massa da matéria seca, foi calculado o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas.

### 5.3 Capacidade máxima de adsorção de P no solo

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do solo foi determinada antes do início do experimento a fim de conhecer o quanto o fator adsorção poderia influenciar na eficácia de cada fonte testada. Para tal, foram retiradas amostras de solo de 0-20 cm para determinação do P remanescente (P-rem).

O fósforo P-rem foi determinado após agitação de 2,5 cm<sup>3</sup> de cada amostra de solo durante cinco minutos com uma solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, e deixadas em repouso para decantação durante 16 horas (ALVAREZ et al. 2000). A diferença entre a quantidade de P adicionado e o quantificado na solução de equilíbrio após o período de agitação, representou o valor do P-rem. As concentrações de P utilizadas para o ajuste das isotermas de adsorção de Langmuir foram baseadas nos valores de P-rem encontrados o solo de acordo com a metodologia proposta por Alvarez et al. (2000) presentes na Tabela 4.

Tabela 4. Valores de P-rem e intervalo para doses de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de P.

Solo	P-rem mg L <sup>-1</sup>	Intervalo	Doses de P mg L <sup>-1</sup>
LVd <sub>1</sub>	62,0	0-60	0, 3, 6, 9, 15, 21, 27, 33, 42, 51, 60
LVd <sub>2</sub>	13,9	0-150	0; 7,5; 15; 22,5; 37,5; 52,5; 67,5; 82,5; 105; 127,5; 150

P-rem = Fósforo remanescente, Alvarez V. et al. (2000)

A CMAP foi estimada por meio do ajuste dos resultados à isoterma de adsorção de Langmuir. Para tanto, 2,5 cm<sup>3</sup> de terra fina seca ao ar (TFSA) foram adicionados em solução contendo CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> com doses de P, a partir da solução de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1000 mg L<sup>-1</sup>. Após 24 h de agitação, as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm por 15 min e o teor de P em solução foi determinado por colorimetria (BRAGA; DEFELIPO, 1974). A quantidade de P adsorvida ao solo foi estimada pela diferença entre a quantidade de P encontrado na solução de equilíbrio e a quantidade de P adicionado, sendo esse processo feito em triplicata.

A partir dos dados obtidos em triplicata, foram construídas isotermas de adsorção de Langmuir, plotando-se a quantidade de P adsorvida ao solo (Q) na ordenada e a concentração de P na solução de equilíbrio (C) na abcissa (Figura 2).

A forma hiperbólica da equação de Langmuir é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{X}{m} = \frac{(a+b+c)}{(1+a.c)}$$

em que  $x/m$  é a quantidade de P adsorvido ao solo em mg P(x)/g solo (m); b é a CMAP do solo (mg g<sup>-1</sup>) de P no solo; C é a concentração de P na solução de equilíbrio (sobrenadante) (mg L<sup>-1</sup>); e a é a constante relacionada com a energia de adsorção do elemento ao solo (mg L<sup>-1</sup>) (OLSEN e WATANABE, 1957). As constantes a e b foram estimadas através da equação linear de Langmuir, obtida pela transformação da equação hiperbólica, que corresponde a:  $C/x/m = 1/ab + C/b$ .

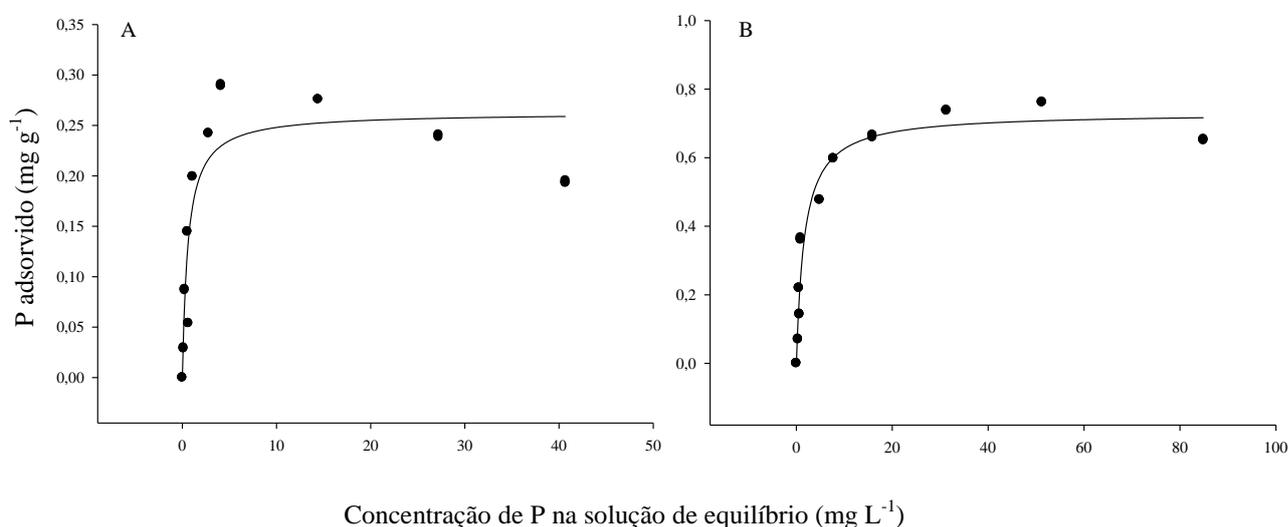


Figura 2 - Representação gráfica da capacidade máxima de adsorção do solo, por meio do ajuste da curva de adsorção à equação da isoterma de Langmuir, (A) solo LVd<sub>1</sub>, com alto teor de P inicial e (B) solo LVd<sub>2</sub>, com baixos teores de P.

Tabela 5. Parâmetros de isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para os solos estudados.

Solos	Equação de Langmuir	R <sup>2</sup>	P-rem mg dm <sup>-3</sup>	CMAP mg kg <sup>-1</sup>	a mg L <sup>-1</sup>	Nível crítico de P mg dm <sup>-3</sup>		P relativo %	
						Mehlich	Resina	Mehlich	Resina
LVd <sub>1</sub>	$C/q = 4,775C - 0,745$	0,98**	62,0	209	6,404	30,92	90	116	
LVd <sub>2</sub>	$C/q = 1,42C + 1,59$	0,99**	13,9	705,47	0,891	9,44	15,9	35,9	

P-rem=Fósforo remanescente; CMAP=Capacidade máxima de adsorção de fósforo; a=energia de ligação \*: P<0,05; \*\* P<0,01. Classificação PR (Mehlich): muito baixo ≤ 50%; baixo: 50,1 – 72,5%; médio: 72,6 – 100%; bom = 100,1 – 150% e, muito bom > 150%.

#### 5.4 Índice de eficiência agronômica

O IEA foi calculado com base no diferencial de produção obtido entre os fosfatos em teste e o superfosfato triplo, considerando-se tanto a produção média de matéria seca da parte aérea como a quantidade de fósforo acumulado pela parte aérea (Büll et al., 1997).

$$\text{IEA} = \frac{(\text{Produção com fosfato testado} - \text{produção sem P})}{(\text{Produção com super triplo} - \text{produção sem P})} \times 100$$

#### 5.5 Análise dos dados

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. 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 e os gráficos foram plotados no programa SigmaPlot versão 11.

### 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram verificadas diferenças ao nível de 1% de probabilidade para solos em relação à altura, diâmetro do colmo, teor de P, massa de matéria seca e no acúmulo de nutrientes na planta.

#### 6.1 Altura e Diâmetro de colmo das plantas de milho

Os valores médios de altura de planta foram diretamente influenciados pela aplicação das fontes e doses de P.

Observa-se no solo LVd<sub>2</sub>, com baixo teor de P, que houve interação entre a doses e fontes de fósforo, proporcionando comportamento quadrático e linear em relação à altura das plantas (Figura 3). Já no solo LVd<sub>1</sub>, com alto teor de P inicialmente, não houve interação entre os fatores fontes e doses de fósforo.

No solo LVd<sub>1</sub> na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup> a fonte FP1 proporcionou a maior altura de planta (131 cm), quando comparada à fonte solúvel de referência SFT, que proporcionou (130), contudo as duas fontes não apresentaram diferença para esta variável. As demais fontes proporcionaram 125 e 122 cm, para o FNR e FP2 respectivamente.

Severino et al (2006), trabalhando em condições de campo, também verificaram resposta da cultura a adubação fosfatada para características de crescimento, como altura e diâmetro do caule, demonstrando que o fósforo é essencial para o arranque inicial da espécie vegetal proporcionando conseqüentemente crescimento da planta.

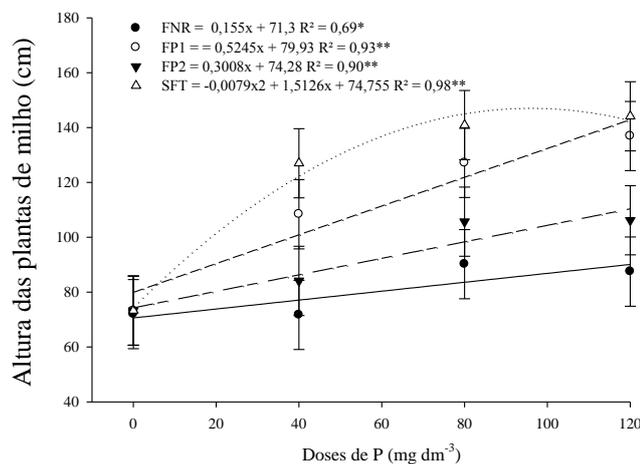


Figura 3. Altura das plantas milho, solo LVd<sub>2</sub>, em função da aplicação de fontes e doses de fósforo.

Verifica-se que no solo LVd<sub>2</sub> houve interação entre os fatores fontes e doses de P, observando comportamento quadrático positivo apenas para a fonte de referência SFT (Figura 3). As demais fontes apresentaram comportamento linear crescente, demonstrando que após o período em que foi realizado a colheita ainda havia potencial de crescimento em altura com a utilização das fontes alternativas. Resultados que corroboram com os deste estudo foram obtidos por Tiritan et al. (2010), que verificaram que a altura de plantas do milho apresentou aumento em função das doses de fósforo, independente do adubo fosfatado utilizado. Lucena et al. (2000), testando doses de fósforo (0 kg ha<sup>-1</sup>, 60 kg ha<sup>-1</sup>, 120 kg ha<sup>-1</sup>, 180 kg ha<sup>-1</sup> e 240 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), verificaram aumento da altura de plantas de milho até a dose de 177 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Observa-se que no solo LVd<sub>2</sub> a altura das plantas de milho foi decrescente para as fontes: SFT > FP1 > FP2 > FR, sendo os maiores valores proporcionados pela SFT, 144 cm na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup>, seguido pela fonte FP1, 137 cm também na mesma dose. As maiores alturas foram observadas em relação à maior dose aplicada, com exceção da fonte FNR que obteve a maior altura na dose de 80 mg dm<sup>-3</sup>. A fonte FP2 proporcionou os maiores valores de altura também quando se utilizou a maior dose, 106 cm. Os resultados concordam com os encontrados por Garcia, (2014) que ao trabalhar com as mesmas fontes em casa de vegetação em cultivo de milho na presença e ausência de calcário, observou que os valores de alturas de plantas se ajustaram a

regressão quadrática para o SFT e lineares para as fontes FP1e FP2 e que, em condições de acidez do solo corrigida, a altura das plantas de milho foi diretamente influenciada pelas doses de P. Vale salientar que nas condições em que foi realizado o experimento a fonte FP1 foi a fonte fosfatada que, em comparação ao SFT, apresentou maiores médias de altura em relação às demais fontes alternativas avaliadas.

Ressalta-se que os valores médios de altura das plantas de milho foram maiores no solo que inicialmente apresentava baixo teor de P quando comparado ao solo de fertilidade constituída, possivelmente porque, em virtude da elevada demanda por P para o seu crescimento inicial, existe também, maior resposta da cultura do milho à adubação fosfatada em condições de escassez deste elemento em solos tropicais (Malavolta, 1980), aliado ao fato de neste solo os teores de matéria orgânica e argila eram superiores ao solo LVD<sub>1</sub>, o que também pode ter influenciado os maiores valores de altura, efeito observado também em outros estudos (Engelbrecht, 1980; Salvador, 1986). Contudo, dentre os componentes morfológicos, a altura de plantas não tem, geralmente, correlação com a produtividade; cultivares modernas, com alto potencial produtivo, são, em sua maioria, de porte baixo, mas também podem ser encontrados materiais de porte alto com desempenhos semelhantes aos baixos (CRUZ et al., 2008).

Em relação do diâmetro do colmo, observa-se que houve interação significativa para os fatores fontes e doses de fósforo nos dois solos estudados. Contudo, para o solo LVD<sub>1</sub>, de fertilidade constituída, nota-se que para este parâmetro morfológico da cultura, o comportamento foi linear para o SFT e FP1. As fontes FNR e FP2 não apresentaram comportamento significativo, demonstrando não influenciar nesta variável

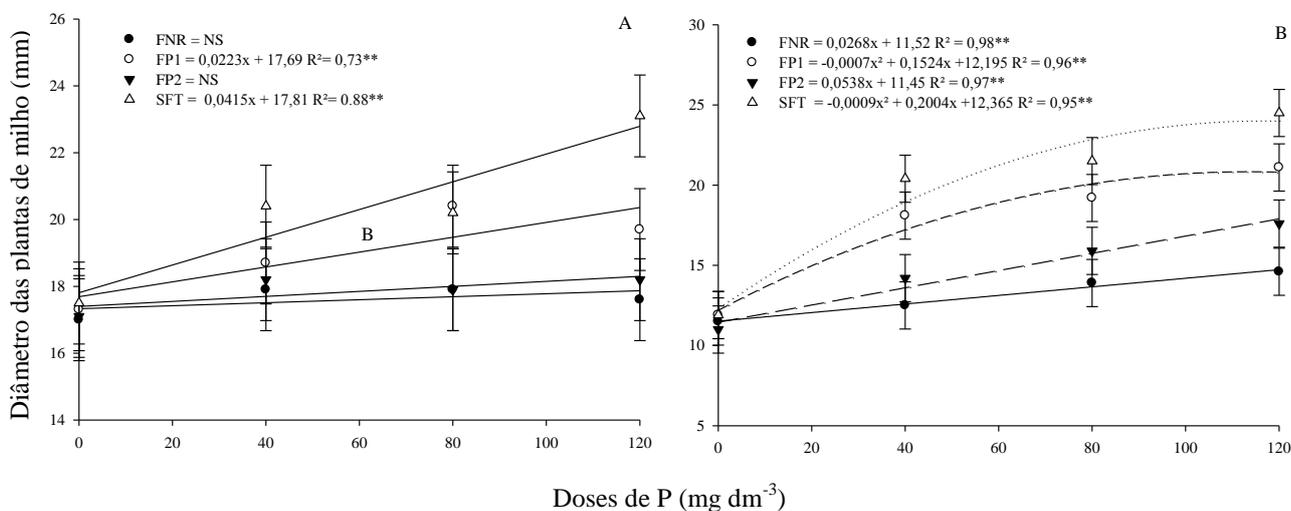


Figura 4. Diâmetro do colmo das plantas milho, solo LVD<sub>1</sub> (A) e solo LVD<sub>2</sub> (B), em função da aplicação de fontes e doses de fósforo.

Nota-se que em condições de fertilidade constituída, ou seja, em solo com altos teores iniciais de fósforo, a fonte SFT proporcionou os maiores diâmetros de colmo (23 mm) quando foi aplicada a maior dose de P ( $120 \text{ mg dm}^{-3}$ ), demonstrando que em doses maiores, poderia conseqüentemente ser também maior o diâmetro da planta, já que o comportamento foi positivo e linear. Essa mesma característica foi observada quando se utilizou a fonte FP1, com a diferença de que os valores médios de diâmetro do colmo proporcionados por esta fonte foram menores quando comparados ao SFT, apresentando 20 mm na dose de  $80 \text{ mg dm}^{-3}$  e 19,7 mm no tratamento com maior dose de  $120 \text{ mg dm}^{-3}$ .

No solo LVd<sub>2</sub>, com baixos teores iniciais de fósforo, observa-se que todas as fontes influenciaram o diâmetro do colmo das plantas de milho. Nesta situação, novamente a fonte FP1 apresentou comportamento semelhante ao da fonte de referência SFT. A fonte alternativa FP1 proporcionou o maior diâmetro (21 mm) quando foi aplicada a maior dose de P ( $120 \text{ mg dm}^{-3}$ ), apresentando comportamento quadrático positivo para esta variável. Já a fonte solúvel de referência SFT, proporcionou diâmetro 24 mm, quando foi utilizada a maior dose de P. As demais fontes FNR e FP2 também proporcionaram os maiores diâmetros de caule nos tratamentos que receberam a maior dose de P, 14,6 e 17,6 mm respectivamente, ambas ajustaram-se ao modelo linear positivo para esta variável. Esses resultados concordam com os encontrados por Gutierrez et al. (2008), que observaram que a fertilização fosfatada proporcionou efeito positivo no diâmetro de caule e altura de plantas da parte aérea do milho, onde o aumento das doses de fósforo proporcionou maior diâmetro do colmo das plantas de milho.

Nota-se que em ambos os solos a fonte que proporcionou os maiores valores de diâmetro do colmo, foram a fonte solúvel de referência SFT, seguida pela fonte alternativa FP1, demonstrando que mesmo para uma cultura anual como o milho, que necessita de altas quantidades de fósforo solúvel disponibilizados de imediato na solução do solo via adubação, esta fonte demonstra ser um potencial fertilizante a ser utilizado já que esta característica morfológica da planta, que é o diâmetro do caule representa correlação com a produtividade por se tratar de um órgão de reserva da planta (CRUZ et al., 2008). O colmo atua como estrutura de armazenamento de sólidos solúveis que serão utilizados, posteriormente, na formação dos grãos (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

## 6.2 Massa de matéria seca das plantas milho

Observa-se que a produção de massa de matéria seca das plantas de milho foi diretamente influenciada pelas fontes e doses de fósforo nos dois solos utilizados (Figura 5).

Verifica-se que no solo LVd1, assim como ocorreu para a característica diâmetro de colmo e como esta variável está diretamente correlacionada com a produção de massa de matéria seca, o comportamento das fontes foi o mesmo, ou seja, nota-se que novamente as fontes SFT e FP1 apresentaram comportamento linear positivo, seguidas pelas fontes FP2 e FNR que não apresentaram influência na produção de massa seca do milho nas condições de solo com fertilidade constituída.

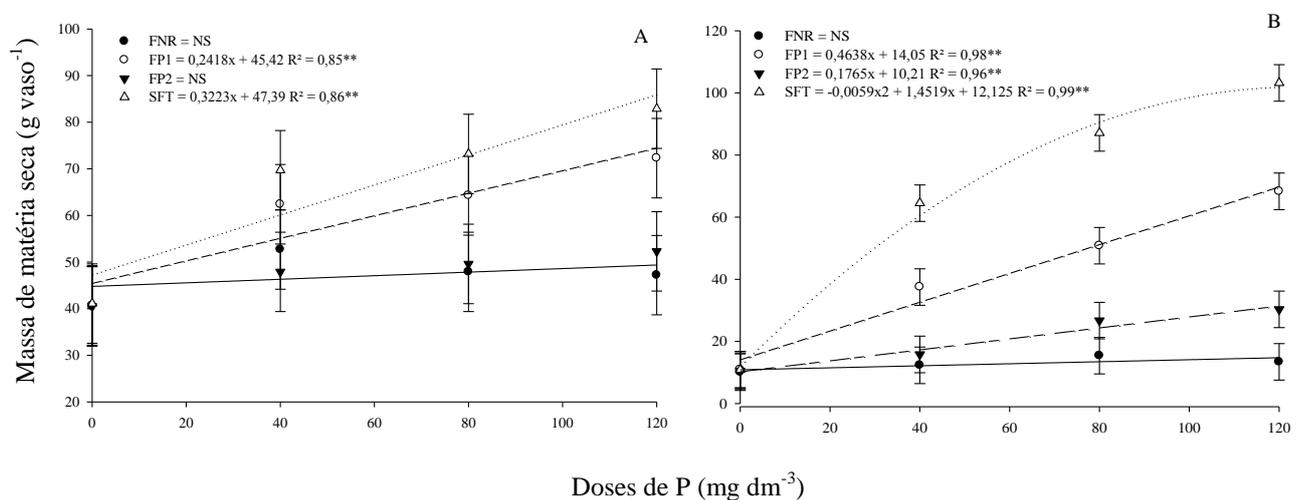


Figura 5. Produção de massa de matéria seca de plantas milho, solo LVd<sub>1</sub> (A) e solo LVd<sub>2</sub> (B), em função da aplicação de fontes e doses de fósforo.

Observa-se que, no solo LVd<sub>1</sub>, a fonte de referência proporcionou produção de  $83 \text{ g vaso}^{-1}$  quando foi utilizada a maior dose de P ( $120 \text{ mg dm}^{-3}$ ), seguida pela fonte FP1 que proporcionou  $72 \text{ g vaso}^{-1}$  também quando foi utilizada a maior dose de P. As fontes FNR e FP2 não apresentaram diferença para a produção de massa de matéria seca em relação ao aumento das doses de fósforo. Seus valores máximos de produção de massa de matéria seca não foram semelhantes e nem próximos aos valores médios proporcionados pelo SFT e FP1, atingindo neste caso,  $53 \text{ g vaso}^{-1}$  maior produção proporcionada pelo FNR, quando foram aplicados ao solo  $40 \text{ mg dm}^{-3}$  de P e para a fonte FP2, a maior produção alcançada foi de  $52 \text{ g vaso}^{-1}$  quando foram aplicados no solo  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  de P.

No solo LVd<sub>2</sub>, observa-se o SFT apresentou comportamento quadrático positivo proporcionando as maiores produções de massa de matéria seca (103 g vaso<sup>-1</sup>) quando foi utilizada a maior dose de fósforo, seguido pela fonte FP1 que apresentou comportamento linear e produção de 68,3 g vaso<sup>-1</sup>, também na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup>. A fonte FP2, nesta situação, apresentou comportamento linear, atingindo a maior produção de 30,3 g vaso<sup>-1</sup> e o FNR de 15,4 g vaso<sup>-1</sup> não apresentando comportamento significativo para as doses de P aplicadas. Nota-se que para todas as fontes alternativas a produção de massa de matéria seca foi menor neste solo quando se compara ao solo anterior, onde os teores iniciais de P já eram considerados altos. Apenas a fonte solúvel de referência apresentou valores médios superiores, possivelmente devido a alta resposta da planta pela adubação fosfatada neste solo já que por ser uma fonte solúvel é capaz de solubilizar grande quantidade de P e satisfazer toda a necessidade da planta.

O menor aproveitamento do P disponibilizado pelas fontes alternativas como a FP1, pela cultura no solo LVd<sub>2</sub> pode ser decorrente também da alta capacidade de adsorção do fósforo que esse solo possui (705 mg dm<sup>-3</sup>) quando comparado ao outro solo que possui capacidade máxima de adsorção de 209 mg dm<sup>-3</sup> de P, o que acaba por reduzir sua disponibilidade às plantas (Corrêa et al., 2008). Contudo, vale salientar que apesar do solo LVd<sub>2</sub> possuir maior capacidade de adsorção de P, a energia de ligação que ele possui é bem menor (0,891 L mg<sup>-1</sup>) que o solo LVd<sub>1</sub> (6,404 L mg<sup>-1</sup>), podendo-se assim inferir que apesar do alto valor da CMAP no solo, esse P encontra-se adsorvido por uma energia de ligação relativamente baixa, podendo tornar-se disponível às plantas com maior facilidade, o que possivelmente possibilitou a maior eficiência de uso do P pela cultura e conseqüentemente maior produção de massa de matéria seca neste solo quando se utilizou a fonte solúvel SFT.

Outro fator que deve ser levado em conta é alta demanda de fósforo pela cultura. Plantas de desenvolvimento intenso e de ciclo curto, como o milho, requerem maior nível de fósforo em solução e reposição mais rápida do P-adsorvido que culturas perenes. Nesta situação fontes como o FNR e o FP2, por exemplo, não foram capazes de suprir e/ou repor esse nutriente de maneira que pudesse ser rapidamente metabolizado pela planta, reduzindo conseqüentemente sua produção de matéria seca.

Verificou-se, portanto, que a produção de massa de matéria seca do milho foi decrescente, para as fontes: SFT ≥ FP1 > FP2 > FNR, para ambos os solos assim como foi observado por Garcia, (2014) que ao testar as mesmas fontes em casa de

vegetação, com cultivo de milho na presença e ausência da calagem, observou que as maiores produções de massa de matéria seca também foram proporcionadas nesta mesma ordem.

Sabe-se que o P é indispensável em uma série de processos metabólicos dos vegetais, conforme verificado no experimento, no qual as plantas cultivadas em condições que não receberam aplicação desse nutriente apresentaram sintomas visuais típicos de deficiência deste nutriente e reduzido crescimento da planta, exceto no solo que já possuía altos teores iniciais de P como se observa nas Figuras 6, 7, 8 e 9. Neste caso, no tratamento onde não houve adição de P, ou seja, na dose 0 mg dm<sup>-3</sup>, não foram observados sintomas de deficiências já que o teor inicial de 36 mg dm<sup>-3</sup> de P neste solo foi capaz de suprir as exigências mínimas da cultura. Assim, observa-se alta resposta na produção de matéria seca em função das doses de P. Tratando-se de solos oxídicos, era de se esperar que a adubação fosfatada promovesse aumentos significativos na produção de matéria seca.

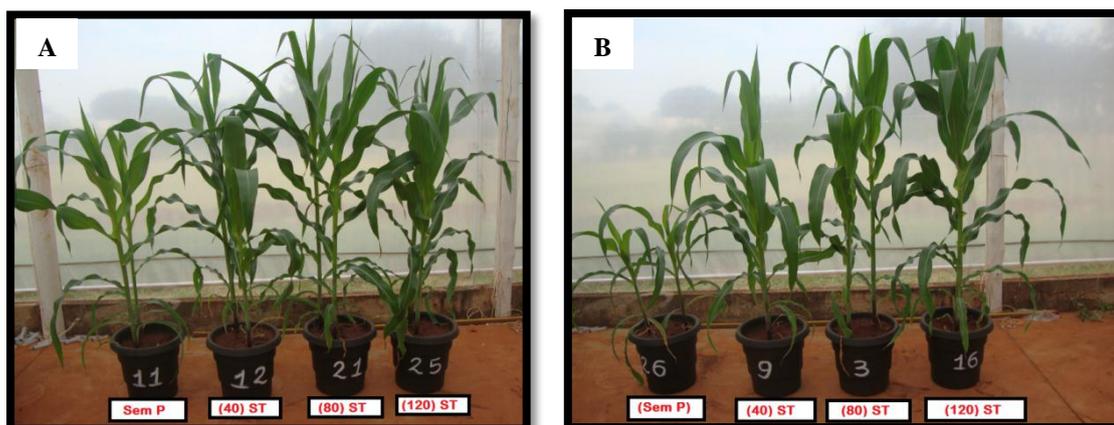


Figura 6. Plantas de milho aos 55 DAE com adição de superfosfato triplo (SFT). (A) solo LVD<sub>1</sub> com 36 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVD<sub>2</sub> com 5 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente.

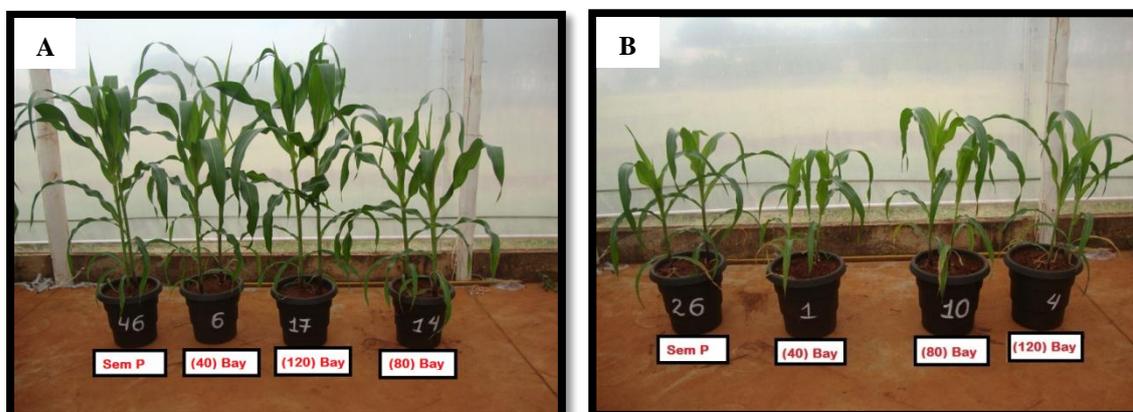


Figura 7. Plantas de milho aos 55 DAE com adição de fosfato natural reativo (FNR) ao solo. (A) solo LVD<sub>1</sub> com 36 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVD<sub>2</sub> com 5 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente.

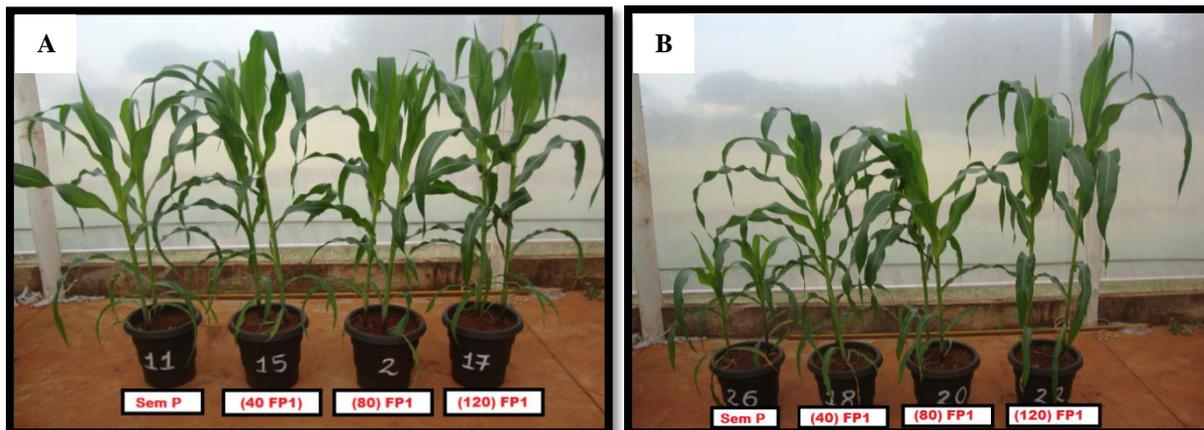


Figura 8. Plantas de milho aos 55 DAE com adição de fosfato precipitado 1 (FP1). (A) solo LVd<sub>1</sub> com 36 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVd<sub>2</sub> com 5 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente.

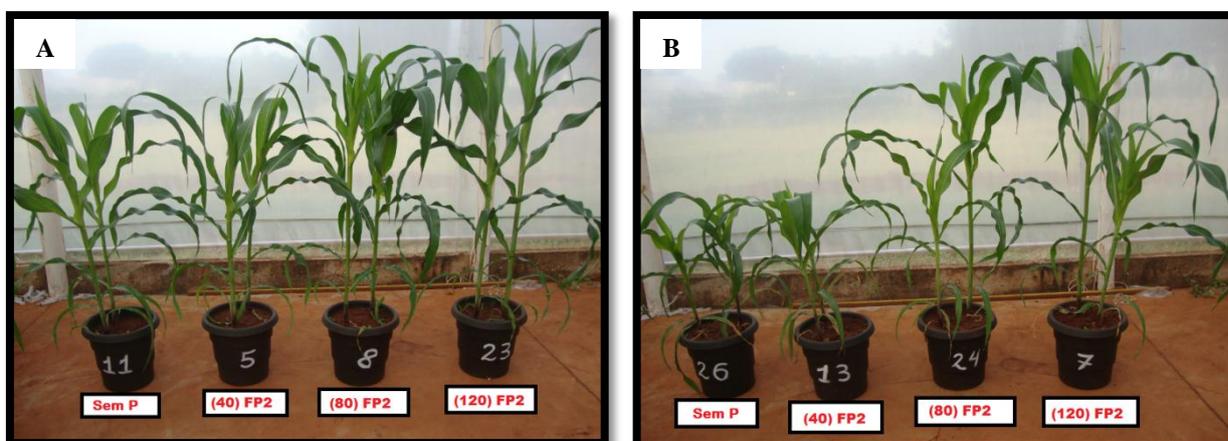


Figura 9. Plantas de milho aos 55 DAE com adição de fosfato precipitado 2 (FP2). (A) solo LVd<sub>1</sub> com 36 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente e (B) solo LVd<sub>2</sub> com 5 mg dm<sup>-3</sup> de P inicialmente.

### 6.3 Acúmulo de macronutrientes nas plantas de milho

Em relação ao acúmulo de macronutrientes nas plantas de milho, observa-se que no solo LVd<sub>1</sub>, não houve interação significativa entre os fatores doses e fontes de fósforo para o acúmulo de nutrientes como o P, Ca e Mg. Entretanto, ao analisar cada fator isoladamente nota-se que as fontes proporcionaram aumento da concentração desses nutrientes na massa de matéria seca da planta, da mesma forma que isoladamente as doses também proporcionaram aumento da concentração dos mesmos nutrientes, apresentando comportamento linear positivo (Figura 10).

A maior concentração de P na planta foi proporcionada pela fonte FP1 (135 mg vaso<sup>-1</sup>), sendo semelhante à concentração proporcionada pela fonte de referência SFT (132 mg vaso<sup>-1</sup>) e superior às demais fontes avaliadas, FNR e FP2, que atingiram concentrações de 106 e 107 mg vaso<sup>-1</sup>, respectivamente. Em relação às doses, a maior concentração de P na planta foi atingida no tratamento onde foi adicionada a maior

dose de P ( $120 \text{ mg dm}^{-3}$ ), com aumento linear crescente para este elemento na planta. Os resultados encontrados neste estudo corroboram com os encontrados por Garcia, (2014) que ao trabalhar em casa de vegetação com as mesmas fontes na presença e ausência de calagem, observou que diferença para o acúmulo de P, a partir da primeira dose se P, entre as fontes testadas.

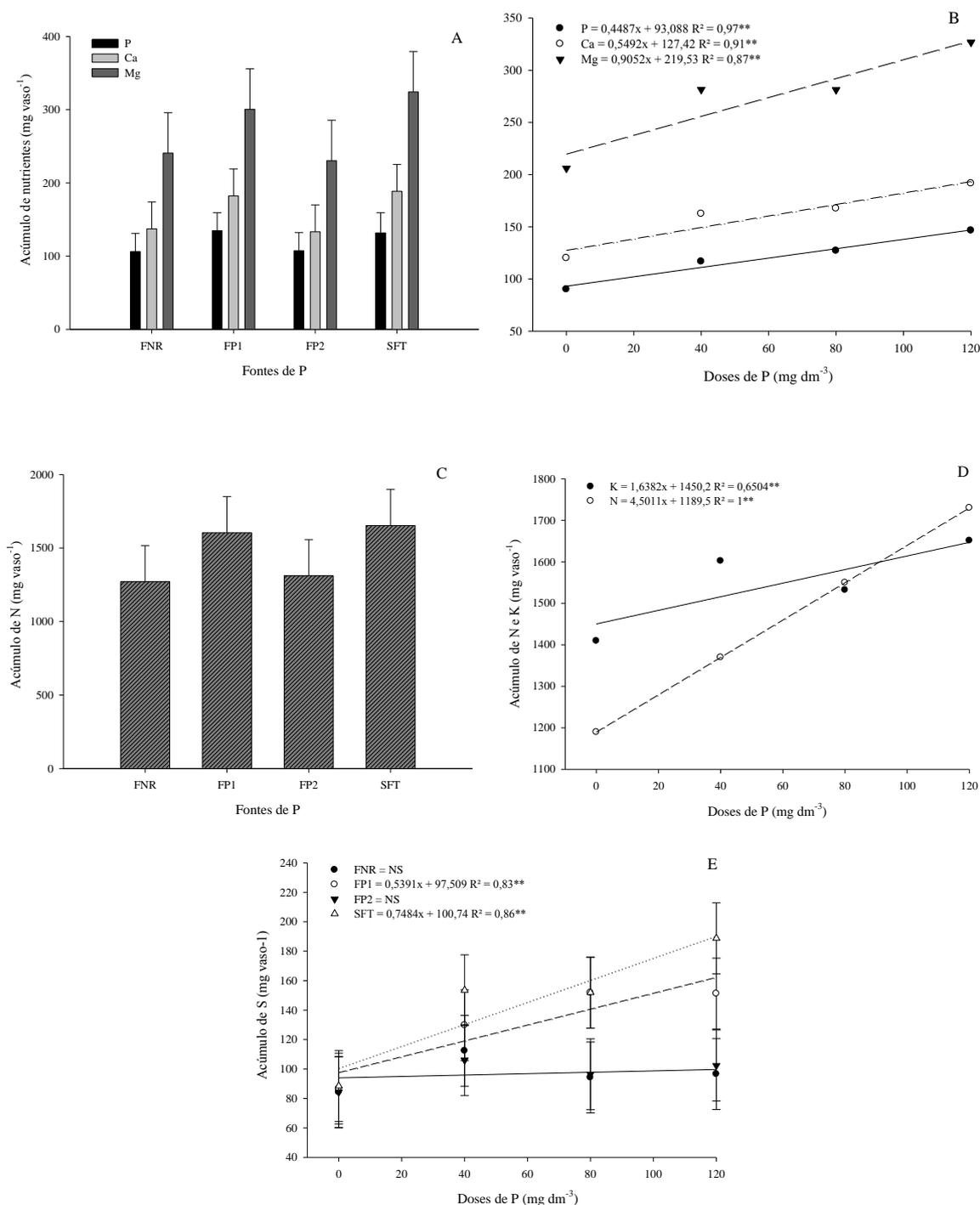


Figura 10. Acúmulo de macronutrientes na planta de milho, solo LVd<sub>1</sub> onde (A e B) representam acúmulo de P, Ca e Mg; (C) acúmulo de nitrogênio; (D) acúmulo de nitrogênio e potássio; (E) acúmulo de enxofre em função da aplicação de fontes e doses de P.

O acúmulo de P no solo  $LVD_2$  apresentou comportamento diferente do solo  $LVD_1$ , onde neste caso, para esta característica observa-se que houve interação entre os fatores fontes e doses de fósforo que se ajustaram em modelo quadrático de regressão as fontes FP1 e SFT. A fonte FP2 apresentou comportamento linear, enquanto que a fonte FNR não proporcionou diferenças para a concentração deste nutriente na planta.

Verifica-se que o maior acúmulo de P na planta, neste solo foi proporcionado pela fonte SFT (186,3 mg por vaso) no tratamento em que foi aplicada a maior dose de P no solo, seguido pela fonte FP1 que proporcionou acúmulo de 165 mg vaso<sup>-1</sup> também na presença da maior concentração de P no solo. Nota-se que neste solo a FP1 proporcionou valores médios de acúmulo de P na planta menores que a fonte de referência SFT, entretanto ao compará-las estatisticamente, nota-se que ambas apresentam comportamentos semelhantes, não diferindo entre si em nenhuma das doses testadas. Sugerindo desta forma que o uso da fonte alternativa FP1 é equivalente ao uso de uma fonte solúvel como o SFT quando se trata da eficiência de uso de fósforo e consequente concentração do mesmo na massa de matéria seca de uma planta como o milho.

As menores concentrações do nutriente na planta foram proporcionadas pela fonte FP2 (83,2 mg por vaso), quando foi utilizada a maior dose de P (120 mg dm<sup>-3</sup>) e pelo FNR (33,2 mg por vaso), quando foi utilizada a dose de 80 mg dm<sup>-3</sup>, substancialmente menores que as fontes anteriores FP1 e SFT e também bem menores que os valores médios proporcionados por estas mesmas fontes nos tratamentos com o solo  $LVD_1$ . Esta situação pode ser explicada devido ao fato de que no solo  $LVD_1$ , os teores iniciais de fósforo já eram considerados altos e consequentemente grande parte do acúmulo deste elemento na planta foi proporcionado pelo P natural do solo, do que essencialmente por estes fertilizantes.

Observa-se também que os teores proporcionados pelas fontes FP1 e SFT foram superiores no solo  $LVD_2$ , quando comparados com o solo  $LVD_1$ , o que pode ser justificado também pela maior resposta das plantas à adubação quando esse elemento encontra-se em solos deficientes de um determinado nutriente. Outro fator que possivelmente influenciou o diferente aproveitamento do P pela planta nos dois solos estudados, se deve ao fato de que apesar do solo  $LVD_2$  possuir maior capacidade de adsorção de P, como já foi dito anteriormente a energia de ligação que ele possui é bem menor (0,891 L mg<sup>-1</sup>) que o solo  $LVD_1$  (6,404 L mg<sup>-1</sup>), podendo-se assim inferir que

apesar do alto valor da CMAP no solo, esse P encontra-se adsorvido por uma energia de ligação relativamente baixa, podendo tornar-se disponível às plantas com maior facilidade, o que pode ter contribuído para aumentar eficiência de uso do P pela cultura neste solo.

Ono et al. (2009) avaliaram os efeitos de diferentes doses de P provenientes de fosfato natural de Arad e do superfosfato triplo sobre o cultivo sucessivo da soja e do milho em Latossolo Vermelho Distroférico, em casa-de-vegetação, e observaram que os teores de P nas folhas foram superiores para o SFT na maior dose utilizada, em relação ao fosfato natural de Arad. O mesmo se observou neste estudo para o acúmulo de P, que foi superior para o SFT na dose de  $120 \text{ mg dm}^{-3}$ , em comparação ao acúmulo de P das fontes, FP1 e FP2, respectivamente.

Para Novais & Smyth (1999), quanto mais fósforo disponível no solo maior será o gradiente de concentração deste elemento ocasionando, portanto, aumento no teor de P na parte aérea. Quando se aumentou a dose de fósforo no solo, ocorreu aumento do coeficiente de difusão do elemento devido à saturação progressiva da superfície da adsorção, o que resultou no aumento da concentração de fósforo na parte aérea, semelhante às observações de Miola et al. (1999).

Em relação ao acúmulo de cálcio e magnésio, observa-se que o comportamento nos dois solos estudados também diferiu. No solo LVd1, observa-se que não houve interação entre os fatores fontes e doses de fósforo para estas variáveis, contudo ao analisá-los isoladamente, nota-se que as fontes de fósforo influenciaram o acúmulo de Ca e de Mg pela planta, assim como apenas as doses também condicionaram diferenças na concentração deste nutrientes no milho.

Nota-se que no solo LVd1, a fonte FP1 assim como a fonte de referência SFT proporcionaram os maiores valores de acúmulo de Ca e Mg na planta,  $182,3$  e  $188,6 \text{ mg vaso}^{-1}$  para o Ca e  $300,6$  e  $324,3 \text{ mg vaso}^{-1}$  para o Mg respectivamente para as duas fontes. A fonte FP2 e o FNR proporcionaram  $133$  e  $137 \text{ mg vaso}^{-1}$  para o Ca e  $230$  e  $241 \text{ mg vaso}^{-1}$  para o Mg, também respectivamente para as duas fontes. Em relação às doses de P, observa-se que as maiores concentrações de Ca e Mg foram proporcionadas nos tratamentos onde foi utilizada a maior dose.

No solo LVd2, (Figura 11), observa-se que para o acúmulo de Ca e Mg, houve interação entre os fatores doses e fontes de fósforo, onde verifica-se ajuste quadrático quando se utilizou o SFT, comportamento linear para a fonte FP1 e FP2 e não significativo quando foi utilizado o FNR, tanto para o acúmulo de Ca quanto para o

acúmulo de Mg. Nesta situação, o maior acúmulo de cálcio e magnésio foi proporcionado pela fonte solúvel de referência SFT, nos tratamentos onde se utilizou a maior dose de fósforo, atingindo valores médios de 350 e 607 mg por vaso respectivamente, seguido pela fonte FP1 que proporcionou acúmulos de 198 mg por vaso de Ca e 344 mg por vaso de Mg. Nos tratamentos onde se utilizou a fonte FP2, foram determinados valores médios de Ca na planta para este solo de 98 mg por vaso e para os tratamentos onde foi aplicada a fonte FNR não houve influência quanto ao acúmulo destes nutrientes no milho.

É possível observar que tanto para o solo LVd<sub>1</sub> e no solo LVd<sub>2</sub>, houve influência direta e/ou conjunta das fontes e doses de fósforo, que seguiu um comportamento semelhante nas duas situações, onde o SFT triplo e a fonte FP1 proporcionaram as maiores concentrações quando foi utilizada a maior dose de P. Isso pode ser explicado porque no caso do magnésio, por exemplo, quase todas as enzimas fosforilativas, tanto de incorporação como de transferência do P inorgânico, dependem da presença de Mg, que é capaz de formar uma ponte entre o ATP e/ou ADP e a molécula da enzima. Essa transferência de energia é fundamental para os processos de fotossíntese, respiração, reações de síntese de compostos orgânicos, absorção iônica e trabalho mecânico, como a expansão celular (MALAVOLTA, 2006; PRADO, 2008; MARSCHNER, 2012). Ocorre um sinergismo entre P e Mg, ou seja, a absorção de P é máxima quando na presença de Mg na solução do solo, por se tratar de um carregador de P, como resultado da participação do Mg na ativação de ATPases da membrana responsáveis pela absorção iônica (MALAVOLTA et al., 1997; MALAVOLTA, 2006).

O aumento no acúmulo de cálcio conforme o aumento da dosagem de P no solo pode estar relacionado principalmente à concentração do elemento na composição dos fertilizantes, com destaque para a fonte FP1 que possui 25% de Ca. Isso não ocorreu com a fonte FNR, já que a mesma possui 32,6% de Ca em sua composição, possivelmente porque em condições de acidez corrigida, como foi o caso do experimento, a solubilização do fosfato natural não é favorecida e conseqüentemente o Ca, assim como o P não foi disponibilizado para a solução do solo.

Em relação ao acúmulo de nitrogênio na planta, nota-se que não houve interação significativa entre os fatores no solo LVd<sub>1</sub>, entretanto, da mesma forma que aconteceu para o P, Ca e Mg, ao analisar cada fator isoladamente, observa-se que as fontes de P proporcionaram diferenças na concentração de nitrogênio na planta, assim como ao analisar isoladamente o efeito das doses de P, verifica-se que o aumento do teor

de P no solo proporcionou aumento da concentração de nitrogênio na planta. No solo LVD<sub>2</sub>, observa-se que as fontes FP1 e SFT ajustaram-se a modelos quadráticos de regressão, já a fonte FP2 apresentou comportamento linear e as doses de FNR não influenciaram na absorção de nitrogênio.

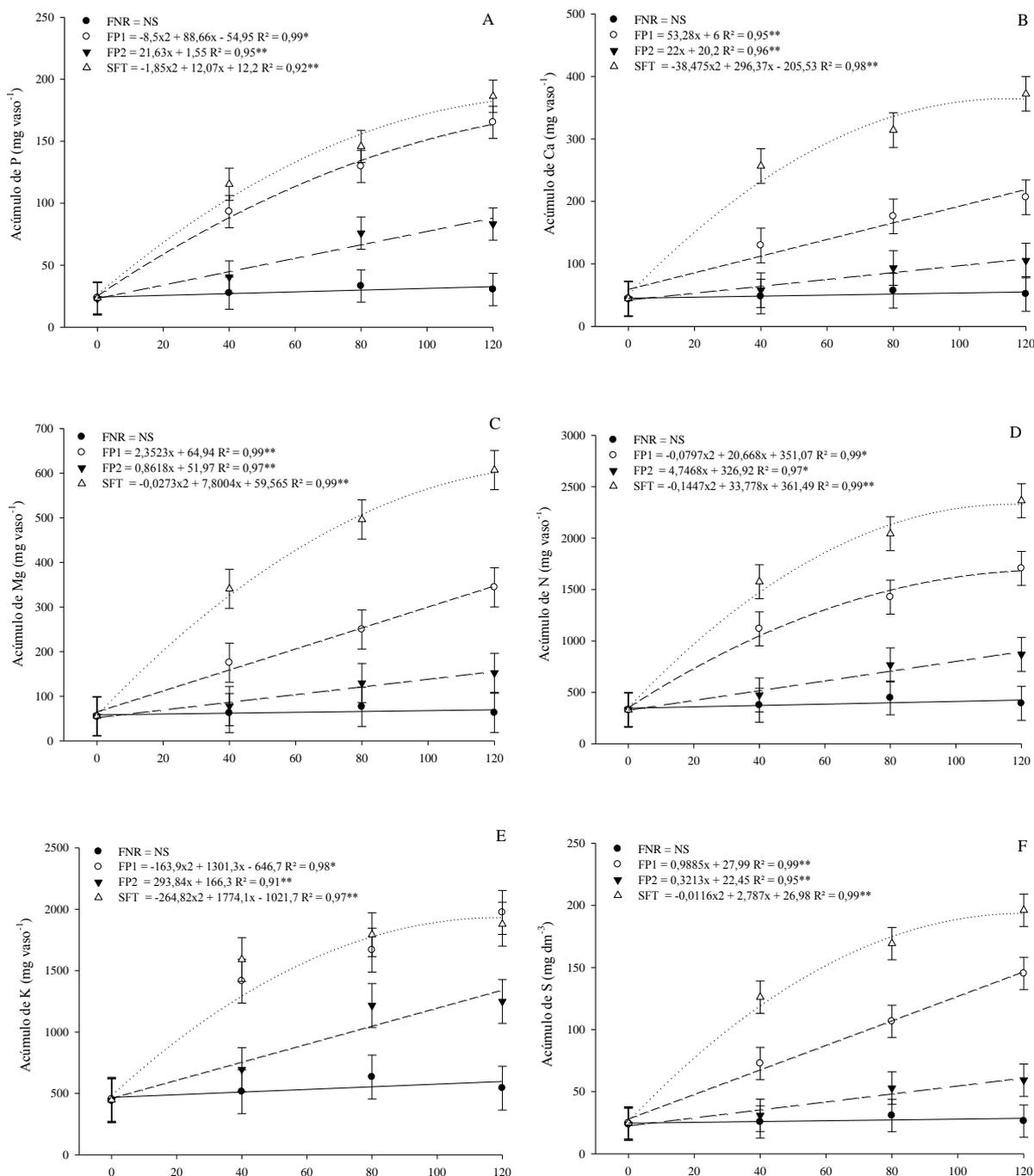


Figura 11. Acúmulo de macronutrientes na planta de milho, solo LVD<sub>2</sub> onde (A) representam acúmulo de P, (B) acúmulo de cálcio, (C) acúmulo de magnésio, (D) acúmulo de nitrogênio (E) acúmulo de potássio e (F) acúmulo de enxofre, em função da aplicação de fontes e doses de P.

Verifica-se que em geral para os dois solos as fontes FP1 e SFT assim como os demais nutrientes proporcionaram aumento na concentração do nitrogênio na planta, nos tratamentos em que foi aplicada a maior dose de P ( $120 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Isso pode ser explicado possivelmente porque o fósforo e o nitrogênio interagem de forma sinérgica, de acordo com Shuman (1994), pois, em doses adequadas, o efeito conjunto na produção vegetal é melhor do que quando aplicados separadamente. A absorção de  $\text{NO}_3^-$  é um processo ativo, requer energia metabólica para o transporte contra o gradiente de potencial eletroquímico, necessitando de substâncias redutoras de ATP (KLEINHOF; WARNER, 1990).

O acúmulo de K foi influenciado apenas pelas doses de P no solo LVd<sub>1</sub>, ajustando-se ao modelo linear de regressão, não apresentando diferença quanto a concentração deste nutriente na planta pelo uso das fontes fosfatadas. No solo LVd<sub>2</sub>, observa-se interação entre as doses e fontes de fósforo em relação ao acúmulo de K na planta de milho onde as fontes FP1 e SFT ajustaram-se a modelos quadráticos de regressão, enquanto a fonte FP1 apresentou comportamento linear e o uso de FNR não influenciou o acúmulo de K na planta. Novamente, assim como para os demais nutrientes, nota-se que a maior dose de P e as fontes FP1 e SFT proporcionaram as maiores concentrações de K no milho. O aumento da concentração de K na planta correlacionado com o aumento das doses de P pode ser explicado possivelmente porque existe absorção passiva de potássio, comandada pela atividade da ATPase através da célula, extremamente dependente de teores adequados de P no solo.

Em relação ao acúmulo de enxofre, verifica-se que em ambos os solos a concentração de S na planta foi influenciada pelas fontes e doses de P. No solo LVd<sub>1</sub> as fontes FP1 e SFT ajustaram-se a modelos lineares de regressão, enquanto que as fontes FP2 e FNR não influenciaram significativamente o acúmulo deste nutriente na planta de milho. Já no solo LVd<sub>2</sub>, as fontes SFT apresentou comportamento quadrático de regressão, enquanto as fontes FP1 e FP2 ajustaram-se ao modelo linear. As doses de FNR não mostraram influenciar significativamente o acúmulo de S na planta.

Contudo, observa-se que o acúmulo de macronutrientes na planta foi maior em geral quando se utilizou a maior dose de P com as fontes FP1 e SFT, demonstrando que em ambos os solos a fonte FP1 demonstra ser eficaz para proporcionar os níveis adequados de P na solução e conseqüentemente fornecer fósforo para uma planta

exigente e de ciclo rápido como o milho da mesma forma que uma fonte fosfatada acidulada.

#### 6.4 Índices de Eficiência Agronômica

O índice de eficiência agronômica foi calculado neste estudo com base na produção de massa de matéria seca da parte aérea de plantas de milho. Observa-se que as fontes e as doses de fósforo influenciaram o índice de eficiência agronômica nos dois solos estudados (Figura 12).

Verifica-se que em ambos os solos a fonte FP1 foi a fonte que apresentou os maiores índices quando comparada à fonte de referência SFT e às demais fontes, resultados que concordam com Garcia, (2014) que ao trabalhar com as mesmas fontes em casa de vegetação, em cultivo de milho no solo com e sem calagem, observou que a fonte FP1 apresentou os melhores índices de eficiência agronômica quando comparada as demais.

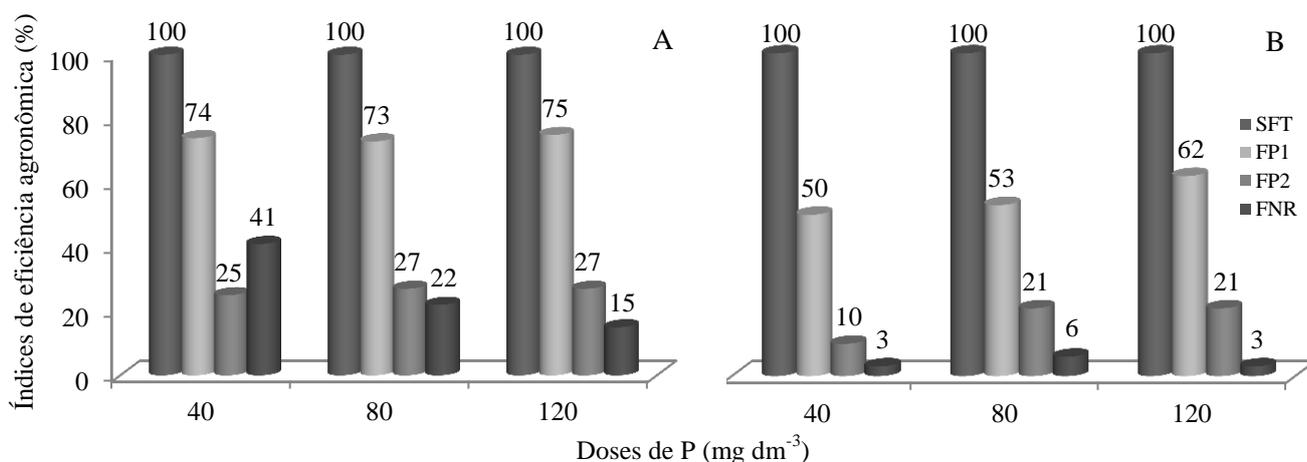


Figura 12. Índices de eficiência agronômica de fosfatos (%) em função de doses e fontes de P na cultura do milho, onde (A) solo LVD<sub>1</sub> e (B) solo LVD<sub>2</sub>.

Nota-se que no solo LVD<sub>1</sub> a eficiência agronômica desta fonte foi praticamente a mesma para todas as doses de P utilizadas, sendo ligeiramente maior (75 %) no tratamento onde havia maiores teores de P no solo. No solo LVD<sub>2</sub> é possível observar que os índices de eficiência para a fonte FP1 foram menores no solo LVD<sub>1</sub>, apresentando valores de 50, 53 e 62 % nas doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, respectivamente.

Em relação à fonte FNR, verifica-se índices muito baixos quando comparada à fonte de referência SFT em ambos os solos, contudo os valores são ainda

menores no solo LVD<sub>2</sub> onde não havia suporte inicial de P para planta como no solo LVD<sub>1</sub>, demonstrando ser essa fonte pouco eficiente para o uso em condições de acidez corrigida e em cultivo com planta de ciclo curto como é o caso do milho.

Para que um composto fosfático seja um fertilizante eficiente, um dos requerimentos é que seja solúvel na solução do solo. A amplitude de dissolução da rocha fosfática é dependente tanto das características da rocha de origem como do solo em que será aplicado, além das plantas cultivadas (HUGHES e GILKES, 1986; GOVERE; CHIEN et al., 2004; HE et al., 2005; YAMPRACHA et al., 2006).

Os resultados deste estudo discordam de Korndörfer et al., 1999 que ao avaliarem o comportamento agrônômico de fosfatos natural (Arad – FNA, Marrocos – FNM e Gafsa – FNG) quanto à produção de grãos de milho comparando com o superfosfato triplo (SFT) concluíram que a capacidade do FNA, FNM E FNG em fornecer P para o milho foi de 60,80 e 97%, respectivamente, quando comparados com o SFT. Os autores sugerem que com o passar do tempo os fosfatos naturais melhorem ainda mais sua eficiência em relação à fonte de alta solubilidade, devido ao maior efeito residual. Isso pode ser explicado porque a lei das massas indica que a dissolução de uma rocha fosfática é favorecida pelas condições do solo que mantêm baixas concentrações de Ca e P na solução do solo. Mackay e Syers, (1986) verificaram que menores níveis de Ca trocável associados com reduzida saturação por Ca na CTC do solo que leva a menores concentrações de Ca na solução do solo, estão relacionados com incrementos na taxa de dissolução das rochas fosfáticas.

Em relação ao comportamento da fonte FP2, observa-se que mesmo um solo como foi o caso do LVD<sub>1</sub>, onde já havia altos teores de P no solo, os índices de eficiência agrônômica deste fertilizante foram menores que 50% quando comparado à fonte de referência SFT. No solo LVD<sub>2</sub>, os valores proporcionados por esta fonte foram ainda menores, 10, 21 e 21 % nas respectivas doses de 40, 80 e 120 mg dm<sup>-3</sup> de P aplicadas ao solo. Este comportamento demonstra que mesmo que esta fonte tenha sido superior ao FNR, por exemplo, o uso da mesma não se aplica para uma cultura de ciclo curto como é caso do milho mesmo em solo de fertilidade constituída, pois não disponibiliza P na solução no momento em que a cultura necessita. Possivelmente esta fonte, por apresentar teor de P total maior que a fonte FP1, 14,40 % possa ser indicada para aplicação com antecedência no solo, em técnicas de fosfatagem, possibilitando conseqüentemente maior tempo de reação no solo e maior solubilização da mesma.

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados evidenciam que a fonte FP1 foi a fonte alternativa que proporcionou as maiores produções de biomassa da parte aérea e acúmulo de fósforo na planta, equivalentes ao SFT, quando utilizada a maior dose de P no solo, além de ser superior às demais fontes testadas.

A fonte FP1 pode ser utilizada com alta eficiência tanto em solo com fertilidade do solo constituída, como em solos com deficiência severa de P e com diferentes capacidades de adsorção de P.

O FNR não é recomendado para cultivos de plantas de ciclo curto, mesmo que o solo já apresente teores iniciais de P alto.

A fonte FP2 também não foi eficiente em ambos os solos estudados, demonstrando ter baixa eficiência agrônômica quando comparada a um fosfato acidulado, não sendo recomendado seu uso em cultivos com plantas de ciclo curto.

## 8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES (IFA) - 34ª **Reunião do Conselho Ampliado: World Agriculture and Fertilizer Demand, Global Fertilizer Supply and Trade.** Ho Chi Minh City (Viet Nam), 2008. Disponível em: <http://www.fertilizer.org/ifa/content/view/full/11423>

CHAVES, A. P. e OBA, C. A. I. (2004): **Críticas ao modelo brasileiro de fertilizantes fosfatados de alta solubilidade** [www.cetem.gov.br /Publicações/Série Estudos e Documentos no 63, 25p.

CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S. C.; FERRAZ, G. B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.3, p.218-224, 2008.

CRUZ, S.C.S.; PEREIRA, F.R.S.; SANTOS JÚNIOR; ALBUQUERQUE, A.W.; PEREIRA, R.G. Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.1, p.62-68, 2008.

ENGELBRECHT, F. **Efeitos da fertilização do solo sobre as relações competitivas iniciais entre *Cyperus rotundus* L. e *Zea mays* L.** 54 f. Trabalho de Graduação - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1980.

FANCELLI, A.L. & D. DOURADO-NETO. **Produção de Milho.** Ed. Agropecuária, Guaíba. 360 p., 2000.

GARCIA, L.A. **Eficiência agronômica de rejeitos da indústria de fertilizantes fosfatados**. 90 f. Dissertação (Mestre em Agronomia: Área de concentração: Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, 2014.

GOEDERT, W.J. e SOUSA, D.M.G., **Uso de Fertilizantes Fosfatados**. In: ESPINOZA, W.; OLIVEIRA, A.J. de. (ed.) Simpósio sobre fertilizantes na agricultura brasileira. Brasília, DF, 06-10 agosto 1984. EMBRAPA-DID, Brasília, p.255-290. (Documentos, 14), 1984.

GOVERE, E.M.; CHIEN, S.H.; FOX, R.H. Evaluation of dissolution of nonconventional phosphate fertilizers in Zimbabwe soils: effects on soil properties. **African Journal of Science and Technology**, Nairobi, v. 5, n. 2, p. 73-82, 2004.

HE, Z.L.; YAO, H.; CALVERT, D.V.; STOFFELLA, P.J.; YANG, X.E.; CHEN, G.; LLOYD, G.M. Dissolution characteristics of Central Florida phosphate rock in an acidic sandy soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 273, n. 1-2, p. 157-166, 2005.

HUGHES, J.C.; GILKES, R.J. The effect of rock phosphate properties on the extent of fertilizer dissolution in soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 24, n. 2, p. 209-217, 1986.

KLEINHOF, A.; WARNER, R. L. Advances in nitrate assimilation. in: MIFLIN, B. J.; LEA, P. J. (ED.). **The biochemistry of plants**. v. 16: intermediary nitrogen metabolism. Academic Press: San diego, 1990. p. 89-120.

KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 391-396, 1999.

LUCENA L.F.C., OLIVEIRA F.A.Z, SILVA I.F & ANDRADE A.P. Resposta do milho a diferentes dosagens de nitrogênio e fósforo aplicados ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, p. 334-337, 2000.

MACKAY, A.D.; SYERS, J.K. Effect of phosphate, calcium and pH on the dissolution of a phosphate rock in soil. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 10, p. 175-184, 1986.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Ceres, 1980. 251p.

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

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3ª ed. Austrália: Elsevier, 2012, 651 p.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação**. Viçosa: UFV, 1999. p. 143-168.

MIOLA, G. R.; TEDESCO, M. J.; BISSANE, C. A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F. A. DE O. Avaliação da disponibilidade de fósforo no solo para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.5, p.813-819, 1999.

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

OLIVEIRA, S. A. Análise foliar. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 245-256.

ONO, F. B. O., Montagna, J., NOVELINO, J. O., SERAFIM, M. E., DALLASTA, D. C., GARBIATE, M. V. Eficiência agronômica de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 33, n. 3, p. 727-734, 2009.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 407 p.

PROCHNOW, L.I.; QUISPE, J.F.S.; FRANCISCO, E.A.B. & BRAGA, G. Effectiveness of phosphate fertilizers of different water solubilities in relation to soil phosphorus adsorption. **Sci. Agric.**, 63:333-340, 2006.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agronômico/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

SALVADOR, P. C. **Estudo da interferência entre tiririca (*Cyperus rotundus* L.) e a cultura do milho (*Zea mays* L.), em condições de casa-de-vegetação**. 42 f. (Trabalho de Graduação) Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1986.

SEVERINO, L. S.; FERREIRA, G. B.; MORAES, C. R. DE A.; GONDIM, T. M. DE S.; FREIRE, W. S. DE A.; CASTRO, D. A. DE; CARDOSO, G. D.; BELTRÃO, N. E. DE M. Crescimento e produtividade da mamoneira adubada com macronutrientes e micronutrientes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.563-568, 2006.

SHUMAN, L. M. Mineral nutrition. in: WILKINSON, R. E. (Ed.). **Plant- environment interactions**. New York: Marcel Dekker, 1994. p. 149-182.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).

TIRITAN, C. S.; SANTOS, D. H.; FOLONI, J. S. S.; ALVES JÚNIOR, R. Adubação fosfatada mineral e organomineral no desenvolvimento do milho. **Colloquium Agrariae**, v.6, p.8- 14, 2010.

YAMPACHA, S.; ATTANANDANA, T.; SIDIBE-DIARRA, A.; SRIVIHOK, A.; YOST, R.S. Predicting the dissolution of four rock phosphates in flooded acid sulfate soils of Thailand. **Soil Science**, Baltimore, v. 171, n. 3, p. 200-209, 2006.

## CAPÍTULO II – “FONTES ALTERNATIVAS DE FOSFATOS EM SOLOS OXÍDICOS CULTIVADOS COM MILHO”

### RESUMO

Os solos brasileiros apresentam em sua grande maioria elevada capacidade de fixação de P. Logo, estudos devem ser realizados no sentido de aprimorar a eficiência das fontes de P disponíveis no mercado. É possível que para solos de elevada capacidade de fixação de P algumas fontes com menor solubilidade em água possam ao longo do tempo tornarem-se alternativas viáveis sob o ponto de vista agrônomico e econômico em comparação às fontes de elevada solubilidade em água. Dentro desse contexto, objetivou-se determinar a eficiência agrônômica, assim como a solubilidade e poder residual de fontes não tradicionais de fertilizantes fosfatados em diferentes solos oxídicos. Para isso foram coletados cinco solos de diferentes classes texturais e de diferentes capacidades de adsorção de P onde foram aplicados 4 fontes de fósforo como o superfosfato triplo (referência), um fosfato natural reativo e dois produtos provenientes de lagoas de rejeitos da própria produção de fertilizantes, denominados como fosfato precipitado 1 (FP1) e fosfato precipitado 2 (PP2), cultivados com milho em casa de vegetação. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os tratamentos dispostos em esquema fatorial 5x4, constituídos por cinco solos e quatro fontes de fósforo, além de um tratamento sem adição de fertilizante fosfatado. A fonte FP1 possui alta capacidade de fornecer fósforo para uma cultura como milho de maneira semelhante à fonte solúvel SFT em solos que apresentem alta quantidade de matéria orgânica e alta capacidade de reserva de P. A fonte FP1 não deve ser utilizada em solos com baixos teores de reserva de P, como solos arenosos, pois a mesma não é eficiente em repor o P da solução rapidamente como uma fonte solúvel, sendo recomendado para esses solos o uso conjunto com um fosfato acidulado. Não é recomendado apenas o uso das fontes FP2 e FNR como fontes de fósforo para uma cultura de ciclo curto como o milho, pois a disponibilidade de P por estas fontes não é imediata, sendo necessário considerar neste caso o seu efeito residual ao longo do tempo independente do solo utilizado.

**Palavras chaves:** Capacidade máxima de adsorção de P, eficiência agrônômica de fertilizantes, fósforo no solo, fontes de fósforo na agricultura.

## CHAPTER II - ALTERNATIVE SOURCES OF PHOSPHATE IN SOILS OXIDIC CULTIVATED WITH CORN

### ABSTRACT

Brazilian soils are mostly high P fixation capacity. Therefore, studies should be undertaken to improve the efficiency of P sources available. It is possible for high soil P settability some sources with lower solubility in water over time can become viable alternatives in the agronomic and economic point of view compared to the sources of high solubility in water. In this context, this study aimed to determine the agronomic efficiency, as well as solubility and residual power of non-traditional sources of phosphate fertilizers in different oxidic soils. For that were collected five different soil textural classes and different P adsorption capacities which were applied 4 phosphorus sources such as triple superphosphate (reference), a reactive phosphate rock and two products from tailings ponds of their own production of fertilizers, termed as precipitate phosphate 1 (FP1) and precipitated phosphate 2 (PP2), cultivated with corn in a greenhouse. The experimental design was a randomized complete block design with four replications and treatments arranged in a 5x4 factorial scheme consisting of five solos and four phosphorus sources, plus a treatment without addition of phosphate fertilizer. The source FP1 possui high ability to provide match for a crop like corn in a similar manner to the SFT soluble source in soils that have high amounts of organic matter and high P. reserve capacity FP1 The source should not be used in soils with low levels of booking P, as sandy soils, because it is not effective in restoring the P solution rapidly as a soluble source is recommended for these soils joint use with an acidulated phosphate. Not only is it recommended the use of FP2 and FNR sources and phosphorus sources for a short cycle crop such as maize, because the availability of phosphorus from these sources is not ready, it is necessary to consider this case the residual effect over time independent of the soil used.

**Key words:** maximum adsorption capacity of P, agronomic efficiency of fertilizer, phosphorus in the soil, sources of phosphorus in agriculture.

## 9. INTRODUÇÃO

O requerimento de grandes quantidades de fosfatos na correção da fertilidade da maioria dos solos brasileiros, a ausência de reservas abundantes de rochas fosfatadas de boa qualidade no país, associados ao elevado custo dos fertilizantes, justificam estudos para otimizar a eficiência no uso de adubos fosfatados. A grande variação na solubilidade dos fosfatos seja ele natural, ou industrializado, a interação do fertilizante com os componentes do solo, a forma de utilização, e as características da planta cultivada, são fatores que reforçam ainda mais a necessidade de estudos voltados para adubação fosfatada.

Os fertilizantes fosfatados mais utilizados na agricultura são solúveis em água, requerem enxofre elementar e concentrados apatíticos de elevada qualidade para a produção, conduzindo à subutilização dos depósitos de fosfato (perdas elevadas de P no beneficiamento), gerando uma grande quantidade de resíduos que contém quantidades consideráveis de P e, conseqüentemente, uma grande preocupação ambiental devido ao volume de rejeitos e a má utilização dos recursos naturais. Esses fertilizantes minerais são obtidos de fontes naturais não renováveis (ZAPATA; ROY, 2004).

A maioria das rochas fosfáticas é de baixa reatividade e apresenta elevados teores de ferro e alumínio em sua constituição, proporcionando baixa disponibilidade de fósforo às culturas. Conseqüentemente, fertilizantes fosfatados solúveis têm sido utilizados preferencialmente para produção das culturas agrícolas (LANA et al., 2004). Entretanto a utilização de rochas fosfáticas aumentou acentuadamente já que a demanda por produtos mais baratos e com relativa eficiência agrônômica também cresceu. Além disso, alguns estudos vêm sendo desenvolvidos no sentido de buscar formas de utilização de rochas e rejeitos como fonte de nutrientes na agricultura.

No trabalho elaborado pela Land and Water Development Division da FAO e pela Agência Internacional de Energia Atômica (ZAPATA e ROY, 2004), chama-se a atenção para o fato de numerosos depósitos de rochas fosfáticas, localizadas nos trópicos e sub-trópicos, não terem sido aproveitadas até hoje. Uma das razões seria não apresentarem a qualidade necessária para produção de fertilizantes solúveis em água, seguindo o processamento convencional. Estes minérios fosfatados de baixa qualidade poderão ser, contudo, aplicados diretamente, principalmente os de origem sedimentar.

Outro caminho que tem vindo a desenvolver-se é o da “agricultura de conservação” ou “agricultura sustentável” que já é praticada no mundo inteiro em mais de 57 milhões de hectares, 3 % das terras aráveis (FAO, 2003). Esta nova prática agrícola irá modificar também o perfil da atual indústria de fertilizantes. Dentro deste contexto é importante conhecer como fontes alternativas de fosfato, sejam os fosfatos naturais, sejam os rejeitos da indústria, podem reagir em solos distintos de regiões tropicais, já que diferentes capacidades de adsorção de fósforo podem interferir na eficiência agrônômica das mesmas.

Contudo, considerando que o P é um elemento essencial para a produção agrícola, sem sucedâneo e finito, é interessante o desenvolvimento de tecnologias que maximizem a eficiência de utilização deste nutriente. É extremamente importante que a indústria dos fertilizantes no Brasil, em especial a dos fosfatados, sinalize objetivos e defina estratégias que permitam reduzir a forte e progressiva dependência externa, além de destinar os resíduos acumulados de maneira agronomicamente eficiente e sustentável. Portanto, partindo do princípio que fontes alternativas de fosfatado podem ser utilizadas com grande eficiência em distintas situações dentro do contexto da agricultura tropical, objetivou-se determinar a eficiência agrônômica, assim como a solubilidade e poder residual de fontes não tradicionais de fertilizantes fosfatados em diferentes solos oxídicos, típicos da região do Cerrado brasileiro.

## **10. MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, no município de Botucatu/SP, durante os meses de março a maio de 2013. Foram selecionados cinco solos oxídicos da Fazenda Experimental Lageado e São Manuel, que apresentaram variações texturais, todos ácidos e com baixos teores de P lábil, classificados, de acordo com SANTOS et al., (2006): como NEOSSOLO Quartzarênico distrófico (RQ<sub>1</sub> e RQ<sub>2</sub>), LATOSSOLO Vermelho Distroférrico (LVdf), textura argilosa, LATOSSOLO Vermelho Distrófico (LVd<sub>1</sub>), textura média e LATOSSOLO Vermelho Distrófico (LVd<sub>2</sub>), textura argilosa. (Tabela 6).

Tabela 6. Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento, coletados na camada 0-20 cm de profundidade.

Solos	Atributos químicos									Análise granulométrica				
	pH CaCl <sub>2</sub>	M.O. g dm <sup>-3</sup>	P <sub>resina</sub> mg dm <sup>-3</sup>	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Argila	Areia	Silte	Textura
				-----mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----						(%)	(g kg <sup>-1</sup> )			
RQ <sub>1</sub>	4,1	7	2	29	1,2	5	1	8	36	21	135	802	63	Arenosa
RQ <sub>2</sub>	4,5	10	2	23	2,0	9	5	15	38	40	84	866	50	Arenosa
Lvdf	4,2	23	8	76	1,9	5	3	10	86	12	584	163	253	Argilosa
LVd <sub>1</sub>	3,8	32	3	94	1,4	2	1	5	99	5	274	669	57	Média
LVd <sub>2</sub>	4,0	33	5	76	2,1	7	3	12	89	14	510	360	130	Argilosa

Aplicou-se calcário dolomítico (PRNT: 98 %) em cada para elevar a saturação por bases a 70 % (Raij et al., 1997). Posteriormente, os solos foram umedecidos à capacidade de campo e acondicionados em recipientes plásticos por 30 dias para a reação do corretivo. Após esse período, os solos foram secos ao ar e adicionados os fertilizantes fosfatados misturados à massa de solo e retornados ao vaso na dose de 120 mg dm<sup>-3</sup> de P, 120 mg dm<sup>-3</sup> de K, 60 mg dm<sup>-3</sup> de N parcelados em duas aplicações aos 15 e aos 30 dias após a emergência além de 2 g vaso<sup>-1</sup> de micronutrientes (B, Zn, Cu, Fe, Mn) como óxidos silicatados.

As fontes de fósforo utilizadas foram o superfosfato triplo como fosfato de referência, um fosfato natural reativo, de origem sedimentar e orgânico, formado pela deposição e posterior decomposição de restos de animais marinhos, sendo proveniente da região do Peru e dois produtos provenientes das lagoas de rejeitos da própria produção de fertilizantes, denominados como fosfato precipitado 1 (FP1) e fosfato precipitado 2 (FP2) que apresentam, respectivamente, 10 e 15 % de P total. Os tratamentos envolvendo o fornecimento de P tiveram os cálculos de adubação baseados no teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total das fontes (Tabela 7 e 8).

Tabela 7. Características químicas dos materiais fosfatados

Amostras	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -T	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -AC	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -CNA	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Ag	K <sub>2</sub> O	S-SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	----- % -----												
FP1	9,10	2,62	3,53	0,00	0,00	3,60	24,76	0,23	0,00	1,05	0,03	0,05	0,08
FP2	14,40	5,97	11,68	0,00	0,00	2,50	15,00	0,34	0,01	3,29	0,08	0,08	0,07
Fosfato reativo	29,40	6,87	5,77	0,00	0,04	2,36	32,60	0,33	0,02	0,39	0,00	0,06	0,09
Super Triplo	48,08	17,04	45,07	37,34	0,00	4,40	13,10	0,26	0,02	1,79	0,07	0,08	0,02

T – Total; AC – Ácido Cítrico a 2% Rel-1:100; CNA - Citrato neutro de amônio+água; Ag – água

Tabela 8. Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas (%).

Fontes <sup>(1)</sup>	Material passante na peneira de 4 mm <sup>(2)</sup>	Material passante na peneira de 1 mm <sup>(3)</sup>
FP1	100	99,26
FP2	88,43	58,17
FNR	100	99
SFT	74,63	6,35

<sup>(1)</sup>FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FNR: Fosfato Reativo e SFT: Super Fosfato Triplo. <sup>(2)</sup>ABNT 5; <sup>(3)</sup>ABNT 18.

Semearam-se 5 sementes por vaso do híbrido de milho 2B810 PW e quinze dias após a emergência foi realizado o desbaste deixando-se duas plantas por vaso durante 55 dias, quando se realizou a colheita. Durante o crescimento da cultura, irrigações diárias foram realizadas, baseados em dados de tanque classe A e evapotranspiração da cultura, mantendo a umidade do solo a 70% da capacidade máxima de retenção de água.

### 10.1 Delineamento experimental e avaliações

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os tratamentos dispostos em esquema fatorial 5x4, constituídos por cinco solos e quatro fontes de fósforo, além de um tratamento sem adição de fertilizante fosfatado, totalizando 100 unidades experimentais. Cada unidade experimental foi constituída de um vaso plástico contendo 19 dm<sup>3</sup> de solo e duas plantas de milho (Figura 13).



Figura 13 – Visão geral do experimento aos 15 dias após a emergência.

Aos 15 e aos 30 DAE foi coletada a solução do solo, com o objetivo de analisar a concentração de íons de fosfato na solução em épocas diferentes, para verificar como o fósforo estava sendo diretamente disponibilizado por cada fonte.

Cada extrator de solução do solo foi composto de um tubo de PVC com 12,7 mm de diâmetro e 40 cm de comprimento, sendo que, aproximadamente 15 cm do tubo de PVC ficava exposto na superfície do solo, conectado, na extremidade inferior, a uma cápsula de cerâmica porosa (6 cm de comprimento e 19 mm de diâmetro). Na extremidade superior, o tubo foi vedado com uma rolha atravessada por dois tubos de nylon: em um deles, era aplicado vácuo e, no outro, ficava conectada uma seringa pela qual se coletava a solução. Aos extratores foi aplicado um vácuo de aproximadamente 70 kPa, com o auxílio de uma bomba elétrica e a solução extraída foi acondicionada em frascos de plástico devidamente identificados, para posteriormente serem encaminhados ao laboratório. Os teores de fósforo na solução foram analisados em laboratório pelo método descrito por Rajj et al.,(2001), utilizando para determinação o colorímetro.

Aos 55 dias após a emergência do milho, antes da colheita, foram determinados o diâmetro do colmo, medido na altura de 1 cm do solo com o auxílio de um paquímetro digital e a altura das plantas medidas com uma régua milimetrada. Em seguida foi efetuado o corte da parte aérea das plantas de cada vaso a 1 cm do solo. O material vegetal foi conduzido ao laboratório onde foi lavado em água corrente, e, posteriormente, com água destilada. Após a lavagem o material vegetal foi seco em estufa com circulação de ar forçada a 65 °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 Bataglia et al., (1983). Com os dados do teor de P, e a massa da matéria seca, foi calculado o acúmulo de nutrientes na parte aérea das plantas.

## **10.2 Capacidade máxima de adsorção de P no solo**

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do solo foi determinada antes do início do experimento a fim de conhecer quanto o fator adsorção poderia influenciar na eficácia de cada fonte testada. Para tal, foram retiradas amostras de solo de 0-20 cm para determinação do P remanescente (P-rem).

O fósforo P-rem foi determinado após agitação de 2,5 cm<sup>3</sup> de cada amostra de solo durante cinco minutos com uma solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, deixadas em repouso para decantação durante 16 horas (Alvarez et al. 2000). A diferença entre a quantidade de P adicionado e o quantificado na solução de

equilíbrio após o período de agitação, representou o valor do P-rem. As concentrações de P utilizadas para o ajuste das isotermas de adsorção de Langmuir foram baseadas nos valores de P-rem encontrados no solo de acordo com a metodologia proposta por Alvarez et al. (2000) presentes na Tabela 9.

Tabela 9. Valores de P-rem e intervalo para doses de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de P.

Solo	P-rem mg L <sup>-1</sup>	Intervalo	Doses de P mg L <sup>-1</sup>
RQ <sub>1</sub>	36	0-80	0; 4; 8; 12; 20; 28; 36; 44; 56; 68; 80
RQ <sub>2</sub>	50,3	0-60	0; 3; 6; 9; 15; 21; 27; 33; 42; 51; 60
LVdf	9,8	0-200	0; 10; 20; 30; 50; 70; 90; 110; 140; 170; 200
LVd <sub>1</sub>	22	0-110	0; 5,5; 11; 16,5; 27,5; 38,5; 49,5; 60,5; 77; 93,5; 110
LVd <sub>2</sub>	13,9	0-150	0; 7,5; 15; 22,5; 37,5; 52,5; 67,5; 82,5; 105; 127,5; 150

P-rem = Fósforo remanescente, Alvarez V. et al. (2000)

A CMAP foi estimada por meio do ajuste dos resultados à isoterma de adsorção de Langmuir. Para tanto, 2,5 cm<sup>3</sup> de terra fina seca ao ar (TFSA) foram adicionados em solução contendo CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> com doses de P, a partir da solução de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1000 mg L<sup>-1</sup>. Após 24 h de agitação, as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm por 15 min e o teor de P em solução foi determinado por colorimetria (BRAGA; DEFELIPO, 1974). A quantidade de P adsorvida ao solo foi estimada pela diferença entre a quantidade de P encontrado na solução de equilíbrio e a quantidade de P adicionado, sendo esse processo feito em triplicata.

A partir dos dados obtidos em triplicata, foram construídas isotermas de adsorção de Langmuir, plotando-se a quantidade de P adsorvida ao solo (Q) na ordenada e a concentração de P na solução de equilíbrio (C) na abcissa (Figura 14).

A forma hiperbólica da equação de Langmuir é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{X}{m} = \frac{(a+b+c)}{(1+a.c)}$$

em que  $x/m$  é a quantidade de P adsorvido ao solo em mg P(x)/g solo (m); **b** é a CMAP do solo (mg g<sup>-1</sup>) de P no solo; **C** é a concentração de P na solução de equilíbrio (sobrenadante) (mg L<sup>-1</sup>); e **a** é a constante relacionada com a energia de adsorção do elemento ao solo (L mg<sup>-1</sup>) (OLSEN e WATANABE, 1957). As constantes a e b foram estimadas através da equação linear de Langmuir, obtida pela transformação da equação hiperbólica, que corresponde a:  $C/x/m = 1/ab + C/b$  (Tabela 10).

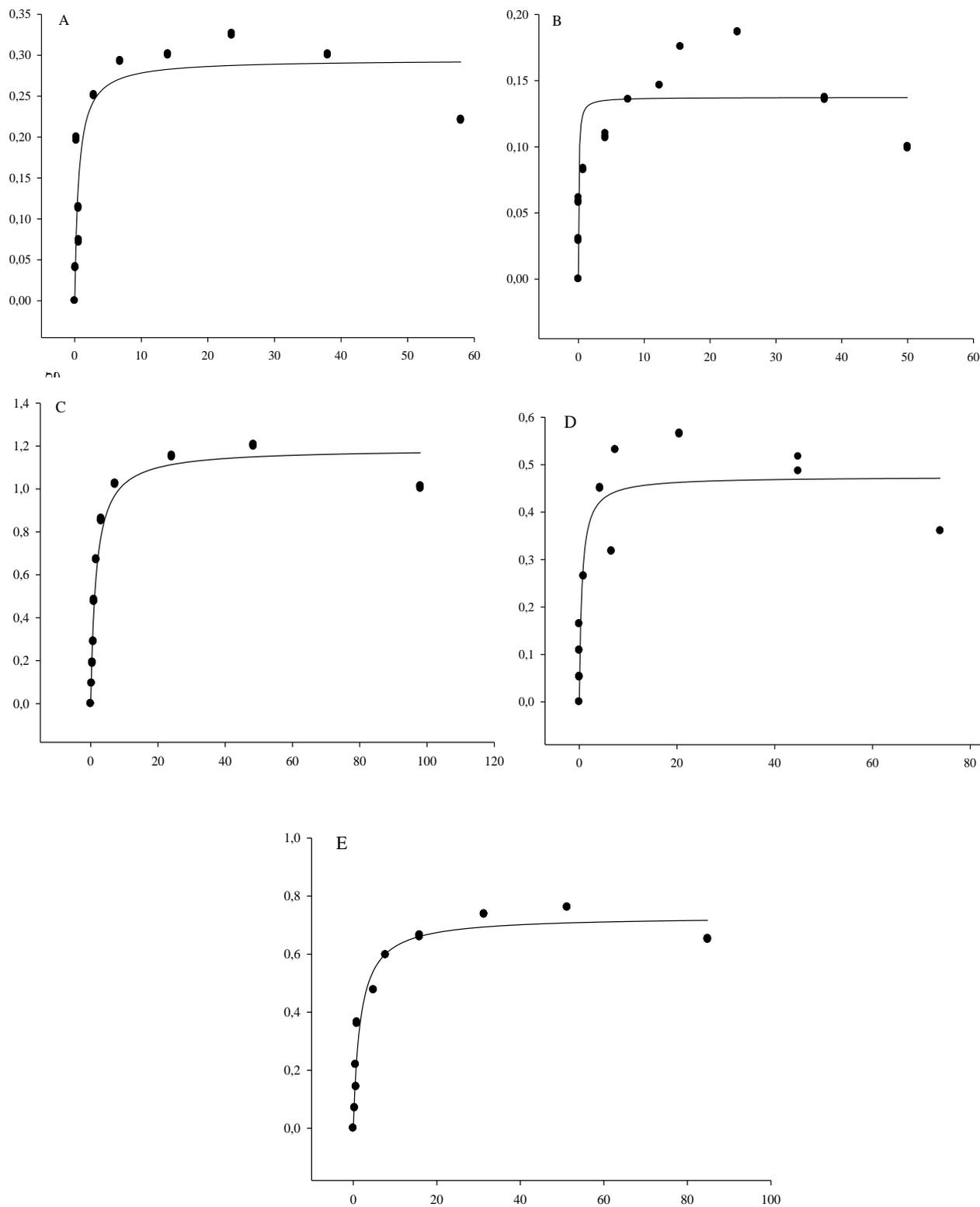


Figura 14. Ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de adsorção de Langmuir para os solos estudados onde (A) solo RQ<sub>1</sub>; (B) solo RQ<sub>2</sub>; (C) solo LVdf; (D) solo LVd<sub>1</sub> e (E) solo LVd<sub>2</sub>.

Tabela 10. Parâmetros de isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para os solos estudados.

Solos	Equação de Langmuir	R <sup>2</sup>	P-rem	CMAP	a	Nível crítico de P	P relativo %	
							mg dm <sup>-3</sup>	mg kg <sup>-1</sup>
RQ <sub>1</sub>	C/q = 4,108C -3,42	0,97**	36	243,43	0,521	18,39	5	11
RQ <sub>2</sub>	C/q = 8,81C -14,12	0,94**	50,3	113,51	0,589	25,01	2	8,0
LVdf	C/q = 0,947C +0,578	0,99**	9,8	1055,4	1,639	7,95	30	100
LVd <sub>1</sub>	C/q = 2,57C - 2,584	0,97**	22	388,14	0,996	12,54	7	24
LVd <sub>2</sub>	C/q = 1,42C +1,59	0,99**	13,9	705,47	0,891	9,44	16	53

P-rem=Fósforo remanescente; CMAP=Capacidade máxima de adsorção de fósforo; a=energia de ligação; \*: P<0,05; \*\* P<0,01. Classificação PR (Mehlich): muito baixo ≤ 50%; baixo: 50,1 – 72,5%; médio: 72,6 – 100%; bom = 100,1 – 150% e, muito bom > 150%.

### 10.3 Índice de eficiência agrônômica

O IEA foi calculado com base no diferencial de produção obtido entre os fosfatos em teste e o superfosfato triplo, considerando-se tanto a produção média de matéria seca da parte aérea como a quantidade de fósforo acumulado pela parte aérea (Büll et al., 1997).

$$\text{IEA} = \frac{(\text{Produção com fosfato testado} - \text{produção sem P})}{(\text{Produção com super triplo} - \text{produção sem P})} \times 100$$

### 10.4 Análise dos dados

Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos a p<0,05 pelo teste de F, as diferenças entre as médias das fontes de fosfatos em cada solo foram comparadas pelo teste de Tukey com auxílio do programa SISVAR.

## 11. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se que os resultados de crescimento das plantas, produtividade de massa de matéria seca e acúmulo de nutrientes, assim como o teor de P na planta e na solução do solo, foram diretamente influenciados pelas fontes fosfatadas nos solos estudados.

### 11.1 Altura e diâmetro do colmo

Verifica-se que houve interação entre os fatores fontes e solos ao nível de 1% de probabilidade para a variável altura das plantas de milho (Tabela 11). Observa-se que os maiores valores de altura foram proporcionados pela fonte de referência SFT no solo LVd<sub>2</sub> (144 cm), seguida pela fonte FP1 que proporcionou a maior altura também no mesmo solo, 135 cm. Nos tratamentos em que foram utilizados a fonte

FP2 também se observa os maiores valores de altura no solo LVd<sub>2</sub> (116,5 cm), da mesma forma que ocorreu para as fontes anteriores os maiores valores de altura proporcionados pela fonte FNR (87,1 cm) foram determinados também neste mesmo solo.

Tabela 11. Valores de altura de plantas em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos.

Altura <sup>(1)</sup>					
cm					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	34,4 Bd	50,1 ABd	123,1 ABb	81,2 ABc	140,9 Aa
RQ <sub>2</sub>	42,2 Bc	58,2 Bc	119,2 ABab	112,8 Ab	134,9 Aa
LVdf	39,4 Bc	54,6 Bc	101,6 Cb	93,7 Bb	128,5 Aa
LVd <sub>1</sub>	43,0 Bd	37,1 Cd	106,9 BCb	75,9 Bc	142,9 Aa
LVd <sub>2</sub>	71,6 Ac	87,1 Ac	135,0 Aa	116,5 Ab	143,9 Aa
CV (%) 12,44					

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

A consideração das características de tamponamento dos três solos utilizados no presente estudo e das diferentes fontes de P utilizadas justifica as variações na magnitude de resposta do milho em crescimento vegetativo observadas entre os solos. Devido às diferenças principalmente no teor de argila dos solos, o fósforo foi disponibilizado de forma distinta conforme o aumento da capacidade tampão de fosfatos (ALVAREZ V. e FONSECA, 1990). Entretanto, nota-se que o solo onde foram determinados os maiores valores de altura, possui maior capacidade de adsorção de P (705 mg dm<sup>-3</sup>) que os solos RQ1 (243 mg dm<sup>-3</sup>) e RQ2 (113,5 mg dm<sup>-3</sup>), por exemplo, que são arenosos, demonstrando que o teor de argila ou a capacidade que esse solo tem em reter fósforo em formas menos lábeis nem sempre pode ser considerado um parâmetro para avaliar a eficiência de uso de P pela planta, pois a quantidade de matéria orgânica também pode interferir nesse processo.

Observa-se que não houve diferença entre os solos apenas para os tratamentos em que foram utilizados a fonte solúvel de referência SFT, devido ao fato de que essa fonte proporcionou quantidades ideais de P solúvel em todos os solos estudados. Contudo, nota-se que os menores valores de altura da planta foram determinados no solo com maior CMAP, o solo LVdf (128,5 cm), justificando que apesar de não ter demonstrado diferença entre os demais solos, esta característica foi influenciada pela capacidade deste solo reter o P em seus componentes mineralógicos.

O mesmo fato observa-se para a fonte FP1 que da mesma forma que a fonte solúvel, também obteve os menores valores de altura no solo LVdf (107 cm). Entretanto para este material fosfatado, ao contrário do que foi observado para a fonte SFT, houve diferença estatística entre os tipos de solos. Isso possivelmente ocorreu porque esta fonte disponibilizou P para a solução, contudo em quantidades menores que o SFT, já que a quantidade de P solúvel desta fonte é maior, e este P disponibilizado pela fonte FP1 foi em parte adsorvido aos colóides do solo LVdf que possui o maior teor de argila quando comparado aos demais.

O mesmo já não foi observado para as fontes FNR e FP2 que obtiveram os menores valores de altura no solo LVd<sub>1</sub> (37 e 75 cm), respectivamente. Estas fontes não seguiram o mesmo comportamento das fontes SFT e FP1 possivelmente porque não disponibilizaram fósforo para a solução no mesmo período de tempo que as demais, principalmente a fonte FNR, já que é conhecido que fosfatos naturais possuem menor solubilidade em solos com acidez corrigida, como foi o caso do estudo.

Em relação aos valores de diâmetro do colmo do milho, nota-se o mesmo comportamento que foi observado para a altura de planta nos tratamentos onde foi utilizada a fonte FP1, onde os maiores valores foram de 20,4 mm no solo LVd<sub>2</sub> e o menor no solo LVdf (14,2) (Tabela 12). O mesmo que ocorreu para a altura das plantas não ocorreu para o diâmetro do caule nos tratamentos onde foi utilizada a fonte de referência SFT, onde neste caso, os maiores valores de diâmetro do colmo foram observados no solo RQ<sub>1</sub>. A fonte FNR seguiu o mesmo comportamento, proporcionando os maiores valores de diâmetro no solo LVd<sub>2</sub> (13,8 mm) e o menor no solo LVd<sub>1</sub> (7,3 mm). Por fim, a fonte FP2 proporcionou os maiores valores de diâmetro do colmo no solo LVd<sub>2</sub>, assim como foi observado para a altura, entretanto o menor diâmetro neste caso, não seguiu o mesmo padrão, sendo observado contudo, no solo LVdf (14,2) (Tabela 12).

Possivelmente os efeitos do fósforo no incremento do diâmetro do caule de plantas de milho ocorreram devido ao fato de que esse nutriente desempenha função estrutural, fazendo parte de compostos orgânicos vitais para o crescimento das plantas, tendo destaque o ATP, sendo agente importante na transferência de energia para todas as sínteses orgânicas das plantas (PRADO, 2008).

Os menores valores de diâmetro do colmo para o solo LVdf pode ser explicado, já que considerando seu alto teor de argila e conseqüentemente a elevada capacidade máxima de adsorção de P, demonstra neste caso, seu caráter drenante de P,

fazendo com que o mesmo passe a competir fortemente com a planta, sendo neste caso, necessário aplicar doses mais elevadas de P o que discorda dos resultados encontrados por Fernandes et al. (2005), ao avaliar respostas de milho a diferentes doses de adubação, não identificaram diferenças no diâmetro do colmo das plantas, que alcançaram valores entre 18,02 e 19,81 mm. Para Gross et al. (2006), isso é resultado de um decréscimo de massa de matéria seca individual, em virtude da competição pelos recursos do meio.

Tabela 12. Valores de diâmetro de colmo de plantas de milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxidicos.

Diâmetro <sup>(1)</sup>					
mm					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	7,5 Bd	8,8 Bd	17,7 ABb	13,7 BCc	24,3 Aa
RQ <sub>2</sub>	7,3 Bc	8,7 Bc	17,4 ABb	17,2 ABb	21,6 ABa
LVdf	7,1 Bc	8,2 Bc	14,2 Bb	12,4 Cb	18,5 Ba
LVd <sub>1</sub>	7,3 Bd	7,3 Bd	17,9 Ab	13,3 Cc	24,6 Aa
LVd <sub>2</sub>	12,9 Ac	13,8 Ac	20,4 Ab	17,8 Ab	21,1 ABa
CV (%) 12,44					

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

Estes resultados evidenciam a resposta da cultura do milho ao tipo de solo, à adubação praticada e quanto ao teor de matéria orgânica, já que cada solo diferia nos teores, evidenciando que a matéria orgânica desempenha um papel fundamental na ciclagem de nutrientes, e neste caso na mineralização do P (TORRES et al., 2008; SILVA et al., 2009).

## 11.2 Massa de matéria seca

A produção de massa de matéria seca da parte aérea foi influenciada pelas fontes de fósforo nos diferentes tipos de solo estudados, onde observa-se que os maiores valores foram proporcionados pela fonte SFT, sendo a maior produção obtida no solo LVd<sub>1</sub> (125,6 g vaso<sup>-1</sup>) (Tabela 13). A maior produção de matéria seca para os tratamentos com SFT se deve a uma liberação mais rápida do fósforo para a solução do solo quando comparada as demais fontes.

Posteriormente ao SFT, as maiores produções entre as fontes alternativas foi proporcionada pela fonte FP<sub>1</sub> no solo LVd<sub>2</sub> (79,5 g vaso<sup>-1</sup>), seguida pela fonte FP<sub>2</sub>, que obteve a maior produção no solo RQ<sub>2</sub> (47,5 g vaso<sup>-1</sup>) equivalente à massa de matéria seca no solo LVd<sub>2</sub> (46,7 g vaso<sup>-1</sup>). Por fim a menor produção foi obtida com o

uso do FNR em todos os solos estudados quando comparada às demais fontes, obtendo os maiores valores no solo LVd<sub>2</sub> (21,1 g vaso<sup>-1</sup>). Esses resultados discordam de Bedin et al., 2003 que ao avaliar, em casa de vegetação, a eficiência de fosfatos no crescimento do milho, em solos distintos quanto à capacidade tampão de fósforo, observou que à exceção do tratamento com fosfato de Araxá e a testemunha, que proporcionaram as menores produções de matéria seca, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre os demais tratamentos.

Tabela 13. Valores de produção de massa de matéria seca da parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos.

Massa de matéria seca <sup>(1)</sup>					
g por vaso					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	4,7 Ad	5,5 ABd	58,5 Bb	22,1 Bc	119,4 Aa
RQ <sub>2</sub>	4,1 Ac	7,2 ABc	54,4 Bb	47,5 Ab	109,8 ABa
LVdf	3,3 Ad	5,3 ABd	34,8 Cb	21,0 Bbc	55,1 Ca
LVd <sub>1</sub>	3,9 Ac	3,9 Bc	51,1 Bb	16,7 Bc	125,6 Aa
LVd <sub>2</sub>	9,6 Ad	21,1 Ad	79,5 Ab	46,7 Ac	99,7 Ba
CV (%) 19,80					

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

Verifica-se que em todos os solos estudados a produção de massa de matéria seca foi menor nos tratamentos onde foi utilizado o fosfato natural reativo. A resposta da planta de milho ao FNR foi muito baixa, sugerindo que, para o uso desse fertilizante em condições de acidez corrigida como foi o caso do presente estudo, seria necessário possivelmente o uso de uma dose de fertilizante extremamente alta para obtenção de 90% da produção máxima de matéria seca. Essa baixa resposta da planta ao uso do FNR possivelmente ocorreu porque os solos receberam calagem para correção do pH resultando em menor eficiência do FNR devido à menor solubilização de fosfato de cálcio nesta condição (Choudhary et al., 1994; Novais & Smyth, 1999).

Os resultados deste trabalho demonstram que, em geral, o fosfato natural reativo, embora possa apresentar maior efeito residual que as fontes mais solúveis (Goedert, 1983), foi menos eficiente que o superfosfato triplo no aumento de produção de matéria seca e no fornecimento de P para plantas de milho.

A diferença de produção de massa de matéria seca entre os solos comprovam que o fator capacidade desempenhou, provavelmente, o mais decisivo papel nas diferenças em disponibilidade de P entre os solos o que conseqüentemente afetou a

produção de massa de matéria seca pelas plantas em cada solo. Ao contrário do que se esperava, as maiores produções foram observadas no solo  $LVD_2$ , que possui capacidade máxima de adsorção superior que os solos  $RQ_1$  e 2 e que ao solo  $LVD_1$  para todas as fontes alternativas. Isso pode estar relacionado ao fator  $Q/I$  e capacidade de reserva e a quantidade de fósforo moderadamente lábeis que podem repor o P solúvel para solução, o que já não ocorre com os solos arenosos, pois a capacidade de reserva desses solos são menores. Aliado a isso as fontes utilizadas também não disponibilizaram P suficiente para suprir a necessidade da planta, o que não aconteceu, por exemplo, com a fonte solúvel de referência SFT, que obteve as maiores e equivalentes produções nos solos com menores CMAP (Figura 15).

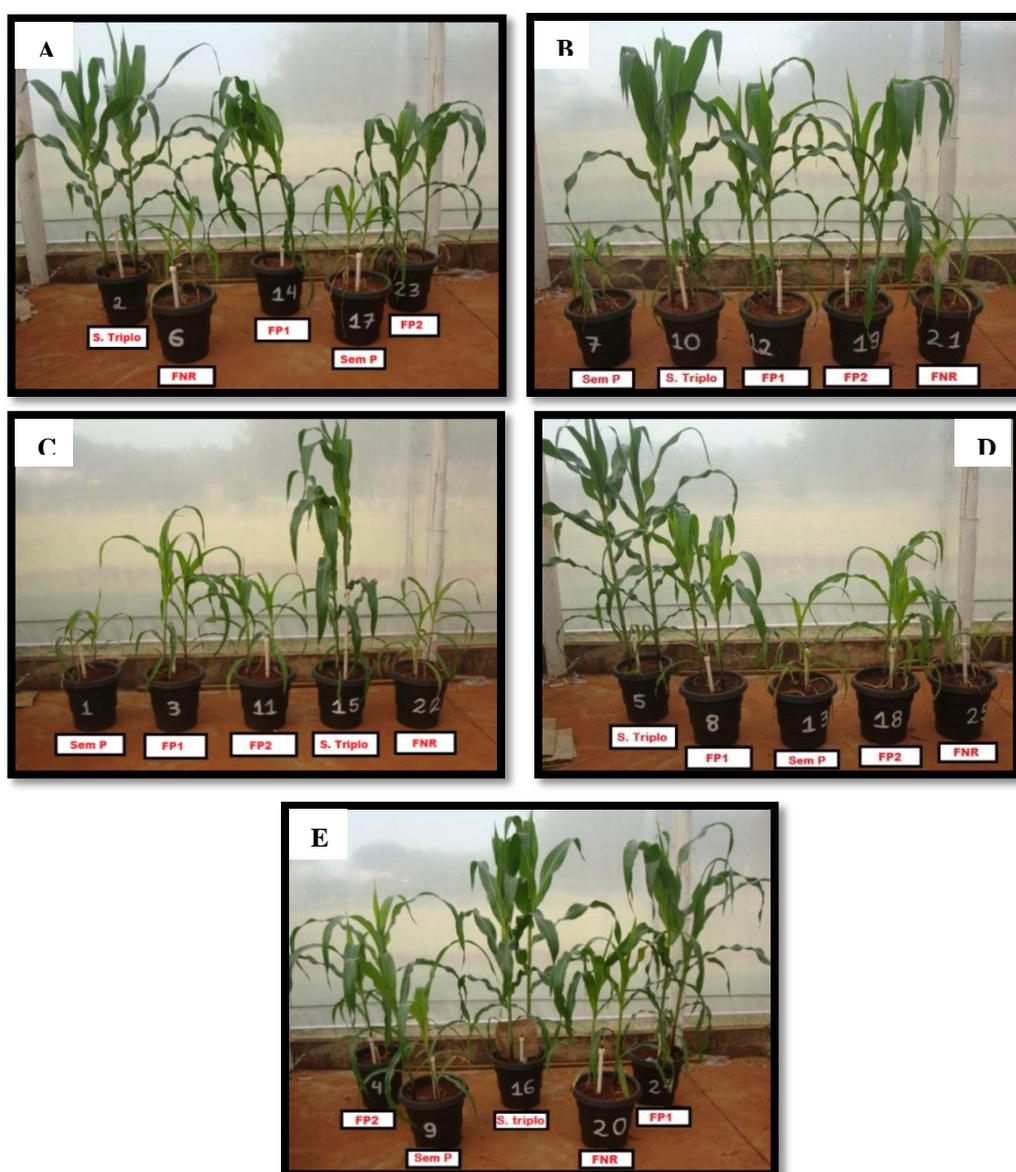


Figura 15. Plantas de milho aos 55 DAE em função da adição de fontes de fosfato em solos oxidicos, onde (A)solo  $RQ_1$ ; (B) solo  $RQ_2$ ; (C) solo  $LVD_1$ ; (D) solo  $LVD_1$  e (E) solo  $LVD_2$ .

### 11.3 Teor e acúmulo de P na planta

O teor e acúmulo de P na planta foram diretamente influenciados pelas fontes e tipos de solo. Nota-se que os maiores teores de P na planta foram proporcionados pelas fontes SFT, no solo LVdf (2,4 g kg<sup>-1</sup>), seguido pelas fontes FP1 e FP2 e nos solos RQ<sub>1</sub> e RQ<sub>2</sub> obtiveram 2,6 e 2,4 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. A fonte FNR não diferiu do tratamento controle quanto ao teor de P na planta, proporcionando o menor teor de P na planta no solo LVd<sub>1</sub>, 1,4 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 14).

Os resultados obtidos para P foliar ficaram dentro da faixa de referência para o milho (2,5 - 3,5 g kg<sup>-1</sup>), segundo Martinez et al. (1999), exceto para o tratamento testemunha e para a fonte FNR. Para Raij et al., 1997, é considerado adequado teor de P para a cultura uma faixa que varia de 2,0 a 4 g kg<sup>-1</sup> (Raij et al., 1997). Pelo conteúdo de P nas plantas cultivadas nos solos RQ, nota-se que os tratamentos envolvendo as fontes alternativas FP1 e FP2 apresentaram maior biodisponibilidade do nutriente, comparativamente ao SFT. É importante destacar que esses dois solos são constituídos de materiais pedológicos mais inertes, do ponto de vista da interferência desses materiais nos processos de solubilização e controle da disponibilidade de P para as plantas, ou seja, apresentam menor fator capacidade de fósforo – FCP, entretanto apesar dos valores médios de teores na planta serem maiores nos solos arenosos, estatisticamente são equivalentes aos teores proporcionados nos solos mais arenosos, havendo diferença entre os solos apenas para o tratamento controle e onde foram aplicados o FNR.

Tabela 14. Valores teor de P em g kg<sup>-1</sup> na parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxidicos.

Solo / Fonte	Teor de P <sup>(1)</sup>				
	g kg <sup>-1</sup>				
	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	1,3 Bc	1,6 Bbc	2,6 a	2,6 a	1,9 Bb
RQ <sub>2</sub>	1,3 Bc	1,7 ABb	2,6 a	2,4 a	1,9 Bb
LVdf	1,4 Bb	1,6 Bb	2,3 a	2,3 a	2,4 Aa
LVd <sub>1</sub>	1,3 Bc	1,4 Bbc	2,2 a	2,3 a	1,8 Bb
LVd <sub>2</sub>	2,0 Ab	2,1 Ab	2,4 ab	2,6 a	2,0 Bb
CV (%) 10,22					

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

Em relação aos tratamentos onde foi aplicado o FNR, o fator que pode ter condicionado ligeira tendência de limitação ao crescimento das plantas, possivelmente esteja ligado ao caráter menos reativo desse fertilizante, propiciando baixa

solubilização no período de condução do ensaio e, em consequência, menor absorção de fósforo.

Em relação ao acúmulo de P na planta, nota-se que os maiores valores foram proporcionados nos tratamentos que receberam a aplicação do SFT no solo RQ<sub>1</sub> (231,4 mg vaso<sup>-1</sup>), seguido pela fonte FP1 que proporcionou o maior acúmulo de P no solo LVd<sub>2</sub> (187 mg vaso<sup>-1</sup>). As fontes FP2 e FNR foram as que proporcionaram as menores proporções de acúmulo de P na planta, 117,7 e 45 mg vaso<sup>-1</sup> respectivamente. Neste caso nota-se grande diferença entre os valores acumulados pelas fontes SFT, FP1, FP2 quando comparados aos da fonte FNR. Como já foi dito anteriormente, essa situação possivelmente é justificada pela baixa solubilidade natural desta fonte que aliado às condições de pH corrigido, torna-se ainda inferior, o que consequentemente interfere na disponibilidade de P para a planta (Tabela 15).

Tabela 15. Valores acúmulo de P na parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos.

Acúmulo de P					
mg por vaso					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	6,2 Bd	8,9 Bd	154,9 ABb	58,7 Bc	231,4 Aa
RQ <sub>2</sub>	5,4 Bc	12,6 ABc	141,2 BCb	113,1 Ab	214,8 Aa
LVdf	4,6 Bc	8,9 Bc	80,1 Db	49,2 Bb	133,7 Aa
LVd <sub>1</sub>	5,3 Bd	5,6 Bd	112,7 CDb	38,9 Bc	225,3 Aa
LVd <sub>2</sub>	25,4 Ac	45,0 Ac	186,9 Aa	117,7 Ab	201,4 Aa
CV (%) 19,98					

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

Nota-se que, houve grande variação entre os valores acumulados pela planta nos diferentes tipos de solo. Isto se deve ao fato de que a demanda de P nas adubações depende da textura do solo, uma vez que o tamponamento, diretamente relacionado ao teor de argila, interfere na fração de P que permanece disponível para a planta. Assim, comparativamente com os solos arenosos, os solos argilosos requerem quantidades mais elevadas de fosfato para atender à demanda de uma dada cultura (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOUSA et al., 2004) como foi observado no solo LVdf que apresenta alta capacidade de adsorção de P (1055,4 mg kg<sup>-1</sup>).

Possivelmente as características dos solos e as fontes de P aplicadas exerceram influência sobre a distribuição das frações fosfatadas. Fabres et al. (1987) afirmam que as concentrações críticas de fósforo inorgânico e, consequentemente,

de fósforo total solúvel, foram variáveis entre solos, enquanto as de fósforo orgânico pouco variaram, indicando a influência de características do solo sobre o acúmulo de fósforo inorgânico na parte aérea da planta. Assim, o aumento do fornecimento de P contribuiu para o acúmulo de fósforo inorgânico, em contrapartida, diminuiu a eficiência de utilização de fósforo. Este fato é mais pronunciado em solos de baixa capacidade de P que, por adsorverem menores quantidades de P, mantêm maior concentração de P disponível às plantas, de modo contrário, solos com maior capacidade, ou com maior capacidade de adsorção de P, conduzem conseqüentemente a maior eficiência de utilização de P para produção de matéria seca como foi o que ocorreu com o solo LVd<sub>2</sub> nos tratamentos com as fontes FP1 e FP2 ao se comparar com solos arenosos como RQ1 e RQ2.

#### **11.4 Acúmulo de macronutrientes**

Em relação ao acúmulo de macronutrientes pela planta de milho observa-se que houve interação entre os fatores fontes de fósforo e tipos de solo para o acúmulo de nitrogênio, cálcio, magnésio e enxofre. Apenas para o potássio não houve interação, contudo quando, analisa-os isoladamente, nota-se que houve diferença para o acúmulo de potássio entre as fontes fosfatadas e nos diferentes tipos de solo (Tabela 16).

O fósforo está intimamente relacionado a outros nutrientes principais, como o nitrogênio, na nutrição das culturas. As proteínas, que contêm quantidades apreciáveis de nitrogênio, não sintetizam em plantas deficientes de fósforo. E em relação ao acúmulo deste nutriente, nota-se que a fonte SFT foi a que proporcionou a maior concentração de N na planta em todos os solos, sendo maior no solo LVd<sub>1</sub> (3111,3 mg por vaso), já que aliado a disponibilidade imediata de P por esta fonte, o conteúdo de matéria orgânica neste solo também era alto, o que possibilitou a mineralização do nitrogênio e conseqüente absorção pela planta. Assim como em tratamentos com a utilização do SFT, foi observado que os solos que receberam a aplicação da fonte FP1 também tiveram diferenças quanto ao acúmulo de N na planta, porém em menor quantidade.

Tabela 16. Acúmulo de macronutrientes mg vaso<sup>-1</sup> na parte aérea do milho em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxidícos.

Acúmulo de nitrogênio <sup>(1)</sup>					
mg por vaso					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	147,3 d	162,6 ABd	1788,8 ABb	695,5 Bc	2697,2 ABa
RQ <sub>2</sub>	116,2 c	197,7 Abc	1657,6 Bb	1420,5 Ab	2479,9 Ba
LVdf	83,7 c	136,5 Bc	988,1 Cb	624,3 Bb	1582,2 Ca
LVd <sub>1</sub>	120,9 c	114,0 Bc	1556,6 Bb	503,5 Bc	3111,3 Aa
LVd <sub>2</sub>	284,8 c	600,4 Ac	2149,8 Aa	1410,3 Ab	2703,9 ABa
CV (%) 21,17					
Acúmulo de Ca <sup>(1)</sup>					
mg por vaso					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	34,5 c	39,9 Bc	255,5 ABb	103,4 ABCc	573,8 ABa
RQ <sub>2</sub>	28,7 c	48,3 Bc	243,1 Bb	210,8 Ab	419,5 Ca
LVdf	20,5 c	30,6 Bd	180,1 Bab	87,6 BCcd	231,6 Da
LVd <sub>1</sub>	23,3 c	27,1 Bc	270,4 ABb	80,2 Cc	612,7 Aa
LVd <sub>2</sub>	57,7 c	111,0 Abc	363,5 Aa	202,4 ABb	463,7 BCa
CV (%) 31,32					
Acúmulo de Mg <sup>(1)</sup>					
mg por vaso					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	28,3 Bc	27,1 Bc	202,5 Bb	87,5 Bc	502,7 Ba
RQ <sub>2</sub>	23,8 Bc	34,9 Bc	184,7 Bb	156,8 Bb	345,3 Ca
LVdf	24,4 Bc	32,9 Bc	164,1 Bab	113,8 Bbc	245,7 Ca
LVd <sub>1</sub>	26,3 Bc	30,9 Bc	269,7 Bb	90,5 Bc	732,6 Aa
LVd <sub>2</sub>	48,2 Ac	102,1 Ac	421,8 Aa	226,8 Ab	481,6 Ba
CV (%) 29,95					
Acúmulo de S <sup>(1)</sup>					
mg por vaso					
Solo / Fonte	Sem P	FNR	FP <sub>1</sub>	FP <sub>2</sub>	SFT
RQ <sub>1</sub>	15,1 c	12,3 Bc	161,1 Ab	55,9 BCc	374,1 Aa
RQ <sub>2</sub>	12,8 c	14,8 Bc	117,8 ABb	103,1 Ab	267,3 Ba
LVdf	7,7 c	10,5 Bc	67,7 Bab	38,8 BCbc	105,2 Da
LVd <sub>1</sub>	12,2 c	9,9 Bc	136,0 Ab	34,2 Cc	261,2 Ba
LVd <sub>2</sub>	21,0 c	44,0 Ac	161,3 Aa	93,6 ABb	200,6 Ca
CV (%) 30,65					
Acúmulo de K					
mg por vaso					
Solos <sup>(1)</sup>			Fontes <sup>(1)</sup>		
RQ <sub>1</sub>	1005,0 B		Sem P		224,6 C
RQ <sub>2</sub>	1352,8 A		FNR		369,8 C
LVdf	861,4 B		FP <sub>1</sub>		1834,5 A
LVd <sub>1</sub>	968,7 B		FP <sub>2</sub>		1216,6 B
LVd <sub>2</sub>	1598,8 A		SFT		2140,8 A
CV (%) 32,09					

<sup>(1)</sup>Médias com letras minúsculas diferentes na mesma linha e maiúsculas na mesma coluna, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 1%.

A fonte FP1 proporcionou acúmulos de 2149,8 mg vaso<sup>-1</sup> no solo LVD<sub>2</sub>, seguida pela fonte FP2 que proporcionou as maiores concentrações de N em solo arenoso (1420,5 mg por vaso) e por fim a fonte FNR que não diferenciou do tratamento controle. Verifica-se à grande importância de níveis adequados de P no solo para o fornecimento ideal também do nitrogênio para a planta. Isso deve à forte interação PxN, pois o fósforo tem papel importante no metabolismo do nitrogênio, uma vez que é componente do ATP (adenosina trifosfato), que fornece energia ao processo ativo de absorção do N (Malavolta et al., 1989) o que pode ser justificado através do trabalho de Alves et al. (1996) onde os autores observaram que deficiência de fósforo reduziu os teores de N total em milho.

O acúmulo de cálcio e magnésio também foi influenciado pelas fontes de fósforo nos diferentes tipos de solo, onde se observa que a fonte de referência SFT proporcionou as maiores concentrações de Ca e Mg na planta em todos os solos estudados, seguida pela fonte FP1, FP2 e o FNR que não diferiu do tratamento controle. As diferenças com o superfosfato triplo (SFT), podem ser atribuídas a mais baixa solubilidade em água das fontes alternativas (Malavolta, 1981) já que as mesmas possuem concentrações maiores principalmente de cálcio, quando comparadas ao SFT, além de que as quantidades de calcário aplicadas aos solos em todos os tratamentos foram ajustadas para elevar o V% a 70.

Os menores acúmulos de cálcio total foram observados nos tratamentos que não receberam a aplicação de fertilizante fosfatado. Evidenciando que a presença do fósforo na solução do solo e o Ca proveniente do próprio fertilizante foram disponibilizados em maior quantidade quando comparados ao tratamento controle, com exceção apenas para a fonte FNR, já que as condições de acidez corrigida e o tempo insuficiente permitiram condições desfavoráveis para que os nutrientes fossem solubilizados e absorvidos pelo milho, em todos os solos estudados. O mesmo fato ocorreu com o magnésio, pois nota-se menores concentrações do nutriente também onde não houve aplicação dos fertilizantes. Conforme Malavolta et al. (1997) o magnésio é um elemento móvel na planta e pelo fato de ser carregador do fósforo, possui interação com esse nutriente, atuando como cofator de enzimas ligadas ao metabolismo desse nutriente, talvez por isso, com a aplicação das fontes de fósforo no solo, houve o aumento no teor de magnésio na matéria seca da planta de milho.

Para o acúmulo de enxofre na planta, nota-se que os tratamentos que receberam a fonte de referência SFT apresentam as maiores concentrações do nutriente na planta, seguida pela fonte FP1, FP2 e FNR, esta no caso, assim como para os demais nutrientes, não diferiu do tratamento controle. Nota-se que no solo RQ1 com o uso da fonte SFT a maior concentração de enxofre foi de 374 mg vaso<sup>-1</sup>, que pode ser explicado porque da mesma forma que o P esse elemento pode ser adsorvido aos colóides do solo, tornando-se indisponível e neste solo, como é um solo de textura arenosa e com baixa capacidade de retenção, possivelmente a concentração de S na solução foi maior, tornando-se mais facilmente disponível para a planta. Contudo é complexo afirmar já que a dinâmica do enxofre no solo envolve várias reações como de oxi-redução, mineralização e imobilização, e adsorção de sulfato nos colóides do solo. Além disso as concentrações de S na planta seguiram comportamento semelhante ao do N, já que a dinâmica do enxofre no solo apresenta aspectos comuns a desse nutriente, como a mineralização da matéria orgânica (7 g kg<sup>-1</sup>). Em contrapartida o solo RQ1 apresentava concentrações muito baixas de M.O, o que leva a afirmar que o fator condicionante pode ter sido a competição por sítios de adsorção nos colóides do solo com o P, permitindo que, onde houve adição de fertilizantes fosfatados, grande parte do P foi retido, enquanto o S permanecia na solução do solo.

Para o acúmulo de K, nota-se que não houve interação entre as fontes fosfatadas e os solos estudados. Contudo os valores de concentração do nutriente na planta variaram de acordo com o tipo de solo e a fonte utilizada isoladamente. Verifica-se que a fonte SFT proporcionou o maior acúmulo de K na planta (2141 mg vaso<sup>-1</sup>), sendo equivalente aos tratamentos que receberam a fonte alternativa FP1 (1834,5 mg vaso<sup>-1</sup>), seguida pela fonte FP2 1216,6 mg vaso<sup>-1</sup> e pela fonte FNR que não diferiu do tratamento controle. Em relação ao solo a maior concentração de K foi observada no solo LVd<sub>2</sub> (1598,8 mg vaso<sup>-1</sup>) e a menor no solo LVdf (861,4 mg vaso<sup>-1</sup>). Os menores acúmulos de potássio foram observados nesse solo, evidenciando possivelmente que o fósforo residual apresentou-se insuficiente para suprir adequadamente as plantas de milho, pois o potássio de acordo com Fuzato (1965) é um elemento de interações, sendo que seu efeito é mais pronunciado quando ele é fornecido juntamente com adubos fosfatados, além de que este solo possui alta capacidade de fixação de P, e alta CTC, o que provavelmente também tenha influenciado a disponibilidade do K na solução.

### 11.5 P na solução do solo

Observa-se que o P na solução foi diretamente influenciado pelas fontes de P nos solos estudados nas duas épocas de avaliação, onde verifica-se que as maiores concentrações de P foram proporcionadas pelas fontes SFT e FP1 (Tabela 17).

Tabela 17. Concentração de P na solução do solo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) em função da aplicação de fontes de fósforo em diferentes solos oxídicos.

P na solução do solo ( $\text{mg dm}^{-3}$ )					
1ª coleta (15 DAE)					
	Sem P	FNR	FP1	FP2	Sup. Triplo
RQ <sub>1</sub>	0 c	0,01 c	0,14 Ba	0,11 ABb	0,16 Aa
RQ <sub>2</sub>	0 b	0,005 b	0,11 Ca	0,10 BCa	0,12 Ca
LVdf	0 d	0,002 d	0,15 Aa	0,09 Dc	0,13 Bab
LVd <sub>1</sub>	0 b	0,005 b	0,12 Ba	0,14 Aa	0,13 Ba
LVd <sub>2</sub>	0 b	0,002 b	0,13 Ca	0,10 CDa	0,12 Ba
CV (%) 16,07					
2ª coleta (50 DAE)					
	Sem P	FNR	FP1	FP2	Sup. Triplo
RQ <sub>1</sub>	0 c	0,02 Abc	0,12 ABb	0,10 Bb	0,16 Aa
RQ <sub>2</sub>	0 c	0,02 Ac	0,12 ABb	0,13 Aab	0,14 ABa
LVdf	0 b	0,02 Ab	0,09 Ca	0,09 Ba	0,11 Ca
LVd <sub>1</sub>	0 c	0,01 Ab	0,11 Ca	0,14 Aa	0,11 Ca
LVd <sub>2</sub>	0 c	0,01 Ac	0,14 Aa	0,10 Bb	0,13 BCab
CV (%) 16,85					

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

As quantidades de fósforo disponibilizadas pelas duas fontes SFT e FP1 aos 15 DAEs foram equivalentes em todos os solos, sendo a maior concentração de P-solúvel observada nos tratamentos com SFT ( $0,16 \text{ mg L}^{-1}$ ) no solo RQ<sub>1</sub>, possivelmente pela menor capacidade de adsorção desse solo. Para a fonte FP1 observa-se nesta mesma época de avaliação, maiores teores em solo argiloso, como o LVdf ( $0,15 \text{ mg L}^{-1}$ ), seguida pela fonte FP2 que proporcionou o maior teor de P-solúvel no solo LVd<sub>1</sub> ( $0,14 \text{ mg L}^{-1}$ ) concordando com RAIJ (2011) que relata que os valores de concentração de fósforo na solução do solo normalmente são baixos, em torno de  $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ , e que isso é decorrente da baixa solubilidade dos compostos de fósforo existentes no solo e da alta capacidade de adsorção do elemento pelas partículas do solo.

Aos 30 DAE, as concentrações de P tiveram pouca variação em relação à primeira época de avaliação, contudo nota-se que, no solo LVdf que antes apresentava teores superiores aos demais solos nos tratamentos com a fonte FP1, obteve posteriormente redução na concentração do P da solução, passando de  $0,15 \text{ mg L}^{-1}$  aos

DAE para  $0,09 \text{ mg L}^{-1}$  aos 30 DAE. Esse mesmo comportamento de redução da concentração do P na solução neste solo também foi observado nos tratamentos com as demais fontes. Isso possivelmente pode ter ocorrido pela própria absorção de P pela planta, como também pela adsorção de P aos colóides, já que a taxa de fixação de fósforo no solo é alta e, conseqüentemente, o seu movimento é limitado. Embora o movimento do fósforo dependa de muitos fatores químicos e físicos do solo, a textura, a dose de fertilizante utilizada e a quantidade de água aplicada são as variáveis que mais afetam seu movimento (VILLAS BÔAS et al., 2002).

O fósforo ao ser aplicado no solo de forma localizada, tanto em solos arenosos como argilosos, tende a aumentar na sua mobilidade, devido à saturação dos sítios de adsorção próximos ao fertilizante. Todavia, qualquer que seja a natureza do solo, a concentração de fósforo em solução é extremamente baixa, devido a elevada tendência de remoção do fósforo na solução, tanto por precipitação quanto por adsorção com compostos de Al, Fe e Ca (FURTINI NETO et al., 2001).

De acordo com O'Neill e Roth (1979) o caminamento do fósforo é também, variável de acordo com a fonte utilizada, sendo observado nesse estudo maiores concentrações de P na solução pelo superfosfato triplo em relação às demais, o que pode ser justificado pela solubilidade em água de cada fonte independente do solo em que foi aplicada. Contudo, cabe afirmar que a fonte FP1 demonstrou ser, dentre as fontes alternativas, a que mais se assemelhou à fonte de referência SFT, o que leva a inferir que este fertilizante fosfatado tem capacidade de repor fósforo para solução de maneira semelhante a um fosfato acidulado. Já a fonte FP2 possui capacidade inferior de disponibilizar o fósforo, assim como o FNR sendo necessário maior quantidade de tempo para avaliação, por exemplo, do efeito residual destas fontes no solo.

### **11.6 Índice de eficiência agronômica**

O índice de eficiência agronômica foi calculado neste estudo com base na produção de massa de matéria seca da parte aérea de plantas de milho para cada fonte e em cada solo estudado (Figura 16).

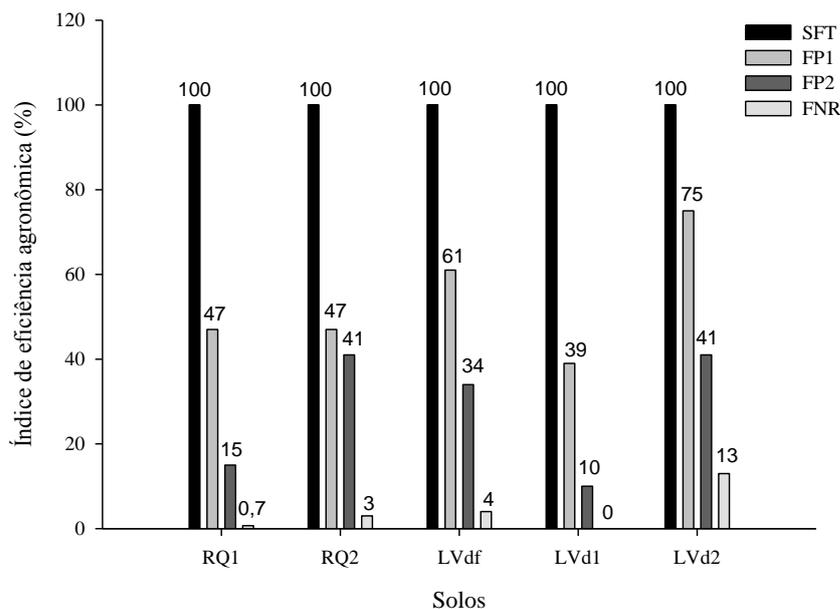


Figura 16. Eficiência Agrônômica em função do tipo de solo e fontes fosfatadas.

Verifica-se que os índices de eficiência agrônômica variaram para cada fonte, em relação ao solo em que foi utilizada. Contudo, cabe salientar, que o mesmo padrão de comportamento se repetiu em relação às fontes, ou seja, nota-se que em todos os solos estudados, os maiores índices de eficiência foram observados para a fonte FP1, seguida pela fonte FP2 e por fim o FNR.

Estudos têm demonstrado que a capacidade de fixação tem influência direta sobre a eficiência agrônômica de fontes de P, e alguns deles indicam que o aumento da capacidade de fixação reduz a eficiência agrônômica relativa das fontes (Hammond & Leon, 1983; Hammond et al., 1986; Butegwa et al., 1996; Flores et al., 2001) o que discorda dos resultados deste trabalho em relação à fonte FP1 que apresentou o maior índice de eficiência (75%) no solo LVd<sub>2</sub>, de textura argilosa com CMAP de 705,47 mg kg<sup>-1</sup> em relação aos solos arenosos, onde os índices foram menores.

Butegwa et al. (1996), num estudo com a cultura do milho e dois tipos de solo (textura média e arenosa), compararam o efeito do aumento da capacidade de fixação sobre a eficiência agrônômica relativa de três fosfatos derivados de rocha de baixa reatividade variando em solubilidade em água, e com diâmetros de partícula diferentes. A capacidade de fixação foi ajustada com um gel de ferro para o solo arenoso de 4 a 14 %, e para o solo de textura média de 37 a 61 %, mantendo-se o pH do solo perto de 6,0 (pH H<sub>2</sub>O) para ambos os solos. Os resultados mostraram que a eficiência agrônômica relativa em relação ao superfosfato triplo, decresceu com o aumento da capacidade de fixação,

observando-se valores maiores de eficiência para as fontes de maior solubilidade em água, o que concorda com este estudo em relação às fontes de maior solubilidade quando compara-se com o fosfato natural por exemplo que apresenta alta reatividade, porém baixa solubilidade.

O fato de no solo LVd<sub>2</sub> ter sido observado os maiores índices de eficiência para todas as fontes testadas, possivelmente está relacionado com a capacidade reserva deste solo, e na quantidade de P moderadamente lábil do mesmo, que pode ter contribuído para repor o P da solução a partir da absorção pela planta, o que já não aconteceu em solos arenosos, cuja a capacidade de reserva é menor. Nota-se que o P relativo, que é o teor de P em relação ao seu nível crítico, neste solo é maior que nos solos arenosos, o que possivelmente também contribuiu para aumentar a eficiência das fontes neste solo. O mesmo foi observado no solo LVdf, que apesar de apresentar a maior capacidade de adsorção de P dentre todos os solos estudados, também possui teor de P relativo maior que os solos arenosos, conseqüentemente isso tenha possibilitado o alto índice de eficiência da fonte FP1 neste solo em relação aos solos RQ1, RQ2 e LVd<sub>1</sub>.

Como visto, sob determinadas condições, não existe aumento da eficiência agrônômica com o incremento da capacidade de fixação de fósforo (Hammond & León, 1983; Hammond et al., 1986; Butegwwa et al., 1996).

Chien & Hammond (1989) realizaram um experimento em casa de vegetação com seis solos de capacidade de fixação diferentes, comparando o efeito da capacidade de fixação sobre a eficiência agrônômica relativa de um fosfato de rocha parcialmente acidulado, cujo padrão de comparação foi um fosfato de elevada solubilidade em água (superfosfato simples). Os autores concluíram que a rocha fosfática parcialmente acidulada foi tão eficiente quanto à fonte solúvel em condições de acidez e elevada capacidade de fixação de fósforo, tendo havido um aumento da eficiência agrônômica com o incremento da capacidade de fixação, o que concorda com este estudo em relação à fonte FP1.

## **12. CONCLUSÕES**

A fonte FP1 possui alta capacidade de fornecer fósforo para uma cultura como milho de maneira semelhante à fonte solúvel SFT em solos que apresentem alta quantidade de matéria orgânica e alta capacidade de reserva de P.

A fonte FP1 não deve ser utilizada em solos com baixos teores de reserva de P, como solos arenosos, pois a mesma não é eficiente em repor o P da solução rapidamente como uma fonte solúvel, sendo recomendado para esses solos o uso conjunto com um fosfato acidulado.

Não é recomendado apenas o uso da fonte FP2 e do FNR como fonte de fósforo para uma cultura de ciclo curto como o milho, pois a disponibilidade de P por estas fontes não são imediata, sendo necessário considerar neste caso o seu efeito residual ao longo do tempo independente do solo utilizado.

### 13. REFERÊNCIAS

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo, 25:27-32, 2000.

ALVES, V.M.C.; NOVAIS, R.F.; OLIVEIRA, M.F.G. & BARROS, N.F. Efeito da omissão de fósforo na absorção de nitrogênio por híbridos de milho (*Zea mays* L.). **Revista Ceres**, 4:435-443, 1996.

BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **Rev. Ceres** 113:73-85, 1974.

BUTEGWA, C.N.; MULLINS, G.L.; CHIEN, S.H. Induced phosphorus fixation and effectiveness of phosphate fertilizers derived from Sukulu Hills phosphate rock. **Fertilizer Research**, v.44, p.231-240, 1996.

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. Agronomic effectiveness of partially acidulated phosphate rocks as influenced by soil phosphorus-fixing capacity. **Plant and Soil**, v.120, p.159-164, 1989.

CHIEN, S. H.; MENON, R. G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, n. 3, p. 227-234, 1995.

CHOUDHARY, M.; PECK, T. R.; PAUL, L. E.; BAILEY, L. D. Long-term comparison of rock phosphate to superphosphate on crop yield in two cereal-legume rotations. **Canadian Journal of Soil Science**. v. 74, p.303-310, 1994.

DEAN, L. A.; FRIED, M. Soil-plant relationships in the phosphorus nutrition of plants. In: PIERRE, W. H.; NORMAN, A. G. (Eds.). **Soil fertilizer phosphorus in crop nutrition**. New York: Academic Press, 1953. Cap.2, p. 43-58.

FABRES, A. S.; NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; CORDEIRO, A. T. Níveis críticos de diferentes frações de fósforo em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.51- 57, 1987.

FERNANDES, F. C. S.; BUZETTI, S.; ARF, O.; ANDRADE, J. A. C. Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 4, n. 2, p. 195-204, 2005.

FLORES, G.C.; TORRES, T.; GONZÁLES, A.; RINCÓN, S. Eficiência de uso de fósforo em triticale y trigo em dos solos com diferentes capacidades de fijación de fósforo. **Terra**, v.19, p.47-54, 2001.

FURTINI NETO A.E.; VALE F.R.; RESENDE A.V.; GUILHERME L.R.G.; GUEDES G.A.A. **Fertilidade do solo**. 1ª ed. Lavras, ESAL/FAEPE. 252p, 2001.

FUZATO, M.G. **Adubação mineral**. In: **Instituto Brasil de Potássio**, ed. Cultura e adubação do algodoeiro, São Paulo, p.475-508, 1965.

GOEDERT, W.J. Efeito residual de fosfatos naturais em solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.18, p.499-506, 1983.

GROSS, M.R.; PINHO, R.G.; BRITO, A.H. Adubação nitrogenada, densidade de semeadura e espaçamento entre fileiras na cultura do milho em sistema de plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v.30, p.387-393, 2006.

HAMMOND, L.L.; LEÓN, L.A. Relative agronomic effectiveness of some Latin America phosphate rocks in Colombian soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF PHOSPHORUS COMPOUNDS, 3., Brussels, 1983. **Anais**. Brussels, 1983. p.124-125.

HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H.; EASTERWOOD, G.W. Agronomic effectiveness of Bayovar phosphate rock in soil with induced phosphorus retention. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1601-1606, 1986.

LANA, R.M.Q.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; LUZ, J.M.Q.; SILVA, J.C. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 3, p. 525-528, 2004.

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

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

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

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, 1999. p. 143-168.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1.ed. Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399 p.

O'NEILL, M. K.; ROTH, R. L. Orthophosphoric acid as phosphorus fertilizer in trickle irrigation, **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 43: 283-286, 1979.

PRADO, R. M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 407 p.  
SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F. & CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

QIN, L. et al. Rhizobia enhance acquisition of phosphorus from different sources by soybean plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 349, p. 25–36, 2011.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C.  
(Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

SILVA, E. C. MURAOKA, T.; VILLANUEVA, F. C. A.; ESPINA, F. S. C.  
Aproveitamento de nitrogênio pelo milho, em razão da adubação verde, nitrogenada e fosfatada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, DF, v. 44, n. 2, p. 118-127, 2009.

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

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A.J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.421-428, 2008.

VILLAS BÔAS, R.L.; ZANINI, J.R.; DUENHAS, L.H. Uso e manejo de fertilizantes em fertirrigação. In: ZANINI, J.R.; VILLAS BÔAS, R.L.; FEITOSA FILHO, J. C. **Uso e manejo da fertirrigação e hidroponia**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p.1-25.

### CAPÍTULO III - “EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FERTILIZANTES FOSFATADOS NO ESTABELECIMENTO DE *Urochloa brizantha*”

#### RESUMO

Um dos maiores problemas no estabelecimento e na manutenção de pastagens nos Latossolos brasileiros reside nos níveis extremamente baixos de fósforo disponível aliado ao alto custo dos fertilizantes. Atualmente no mercado tem aumentado nos últimos anos a utilização de fontes alternativas, como as rochas fosfáticas. Dentro deste contexto, o objetivo foi avaliar a produção de biomassa e a eficiência agronômica em função do fornecimento de fósforo por diferentes fontes fosfatadas. O experimento foi conduzido em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3x5, com 4 repetições, totalizando-se 60 parcelas, com 30 m<sup>2</sup> cada. Os tratamentos foram compostos de quatro fontes de fertilizantes fosfatados: fosfato precipitado 1 (FP1), fosfato precipitado 2 (FP2), fosfato reativo e superfosfato triplo, além do tratamento sem aplicação de fósforo e o outro fator correspondeu a 3 condições de acidez, V% original do solo, V% intermediário (45) e V% corrigido (60). Foram aplicados 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> correspondendo a uma única dose de cada fonte, de acordo com as recomendações para a cultura. Os dados obtidos foram submetidos ao teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. As fontes alternativas proporcionaram altos índices de eficiência agronômica e alta produção de massa de matéria seca do capim marandu. O FNR proporcionou a maior produção de matéria seca e o maior índice de eficiência agronômica apenas no tratamento onde não houve aplicação de calcário no quarto e último corte avaliativo. O FP2 apresentou melhores rendimentos em condições de acidez corrigida. O FP1 obteve melhores rendimentos de produção de massa de matéria seca, número de folhas e perfilhos, acúmulo de P e maior IEA em condições de acidez intermediária sendo em geral superior a todas as outras fontes analisadas. As fontes testadas proporcionaram teores de fósforo maiores que o nível crítico específico para este solo, satisfazendo portanto a necessidade da cultura.

**Palavras chaves:** Fósforo em pastagem, fontes de fósforo, nível crítico de fósforo, disponibilidade de fósforo em pastagem.

### CHAPTER III - "AGRONOMIC PHOSPHATE FERTILIZER EFFICIENCY IN THE ESTABLISHMENT *Urochloa brizantha*"

#### ABSTRACT

One of the biggest problems in the establishment and maintenance of pastures in Brazilian Oxisols lies in the extremely low levels of available phosphorus combined with the high cost of fertilizers currently available on the market has increased in recent years, the use of alternative sources, such as phosphate rocks. Within this context, the objective was to evaluate the production of biomass and agronomic efficiency due to the phosphorus supply in different phosphate sources. The experiment was conducted in randomized blocks in a factorial scheme 3x5, with four repetitions, totalizing 60 plots with 30 m<sup>2</sup> each. The treatments consisted of four sources of phosphate fertilizers: precipitate phosphate 1 (FP1), precipitated phosphate 2 (FP2), reactive phosphate and triple superphosphate, in addition to treatment without phosphorus application and the other factor corresponded to 3 acidic conditions, V original ground%, V%, intermediate (45)% and V corrected (60). 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> corresponding to a single dose of each source were applied, according to the recommendations for the culture. The data were submitted to Tukey test at 5% probability. Alternative sources provided high levels of agronomic efficiency and high production of dry matter of palisade grass. The FNR provided the highest yield of dry matter and the highest agronomic efficiency only in treatment where there was no application of lime in the fourth and final cut evaluative. The FP2 showed better yields corrected acidic conditions. The FP1 achieved better mass production of dry matter yields, number of leaves and tillers and accumulation of P and higher IEA in intermediate acidic conditions being generally superior to all other sources analyzed. The sources provided tested phosphorus larger than the critical level for this particular soil thus satisfying the need for culture.

**Key words:** phosphorus on pasture, sources of phosphorus, phosphorus critical level, phosphorus availability in pasture.

## 14. INTRODUÇÃO

Dentre os vários nutrientes que as plantas precisam para produzir, o fósforo (P) ocupa lugar de destaque, devido à sua deficiência generalizada na maioria dos solos brasileiros, que de maneira geral, em função do alto grau de intemperismo a que foram submetidos ao longo de sua formação, apresentam baixa fertilidade natural por conta da elevada acidez, baixa saturação por bases, toxicidade de alguns elementos químicos e baixa disponibilidade de nutrientes. A baixa reversibilidade da adsorção desse elemento ao solo diminui a eficiência no seu aproveitamento pelas plantas (Novais & Smyth, 1999). Isso justifica o fato de se aplicar elevadas quantidades de fertilizantes para satisfazer a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação do elemento (FURTINI NETO et al., 2001).

Considerando que o fósforo desempenha importante papel no desenvolvimento radicular e no perfilhamento das gramíneas, a sua deficiência passa a limitar a capacidade produtiva das pastagens. Um dos maiores problemas no estabelecimento e na manutenção de pastagens nos Latossolos brasileiros reside nos níveis extremamente baixos de fósforo disponível. Nessa situação, a adubação fosfatada é fundamental, independente do sistema de exploração, para que esse elemento não seja limitante na resposta da planta forrageira.

Embora seja tecnicamente indiscutível a necessidade de adubação fosfatada na recuperação ou renovação de pastagens, na maioria dos solos na região dos Cerrados, sua adoção geralmente esbarra no problema da baixa lucratividade de sistemas de pecuária extensiva, ainda predominantes nesta região. Uma das alternativas para reduzir custos pode ser a utilização de fosfatos naturais (FN) para aplicação direta nas pastagens (YOST et al., 1982; SANZONOWICZ & GOEDERT, 1986).

Dentre os macronutrientes primários, o fósforo é o que apresenta a maior variação quanto aos fertilizantes disponíveis no mercado. As principais fontes de fósforo utilizadas na agricultura são obtidas industrialmente pelo tratamento de rochas fosfáticas com ácidos que possuem elevada solubilidade em água, como os superfosfatos e os fosfatos de amônio. Nos solos tropicais agricultáveis, essas fontes têm rápida dissolução, favorecendo a interação do elemento com o solo e reduzindo a disponibilidade de P às plantas. Nos últimos anos, a utilização de fontes alternativas, como as rochas fosfáticas em estado natural (fosfato natural), aumentou acentuadamente, embora esses

produtos tenham baixa solubilidade em água quando comparados aos fosfatos solúveis (HOROWITZ ; MEURER, 2003).

A produção de fertilizantes fosfatados gera muitos rejeitos e entre esses estão materiais ainda relativamente ricos em P, cujo aproveitamento não é possível pelos atuais métodos industriais, representando, portanto, um bem mineral não utilizado e um problema ambiental preocupante, devido aos grandes volumes envolvidos. Dentro deste contexto relacionado à interação do nutriente no sistema solo-planta e sua disponibilidade para as culturas, e também pela busca de maior eficiência nas adubações, torna-se indispensável à realização de pesquisas, onde a integração de informações pode levar a novas alternativas de uso e manejo de fertilizantes fosfatados.

Diante do exposto, o objetivo foi avaliar a produção de biomassa e a eficiência agrônômica de distintas fontes de fertilizantes fosfatados a partir da aplicação no sistema de pastagem com *Urochloa brizantha*, cultivar Marandú.

## 15. MATERIAL E MÉTODOS

### 15.1. Localização e instalação dos experimentos

O experimento foi conduzido em campo, em área pertencente à Fazenda Experimental Lageado, junto à Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, situada no município de Botucatu/SP, latitude 22°51'S, longitude 48°26'W e altitude de 740 m. Segundo critérios utilizados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2006), o solo do local é caracterizado como LATOSSOLO Vermelho distrófico, textura argilosa, cujas características químicas e físicas são representadas na Tabela 18.

Tabela 18. Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento, coletados na camada de 0-20 cm de profundidade.

Solos	pH	M.O. g dm <sup>-3</sup>	Atributos químicos							V% (%)	Análise granulométrica			
			P <sub>resina</sub> mg dm <sup>-3</sup>	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC		Areia	Argila	Silte	Textura
LVd	4,0	33	5	76	2,1	7	3	12	89	14	360	510	130	Argilosa

O clima é caracterizado como mesotérmico úmido e do tipo Cwa segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual em torno de 1450 mm, a temperatura média do mês mais quente é superior a 28 °C e a do mês mais frio é de 13 °C. A Figura 17 apresenta os dados de temperatura e precipitação referentes ao período de

avaliação deste estudo, que foram coletados na estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agrônomicas se encontram relacionados ao período de condução do ensaio, referente aos meses de abril de 2013 a dezembro de 2013.

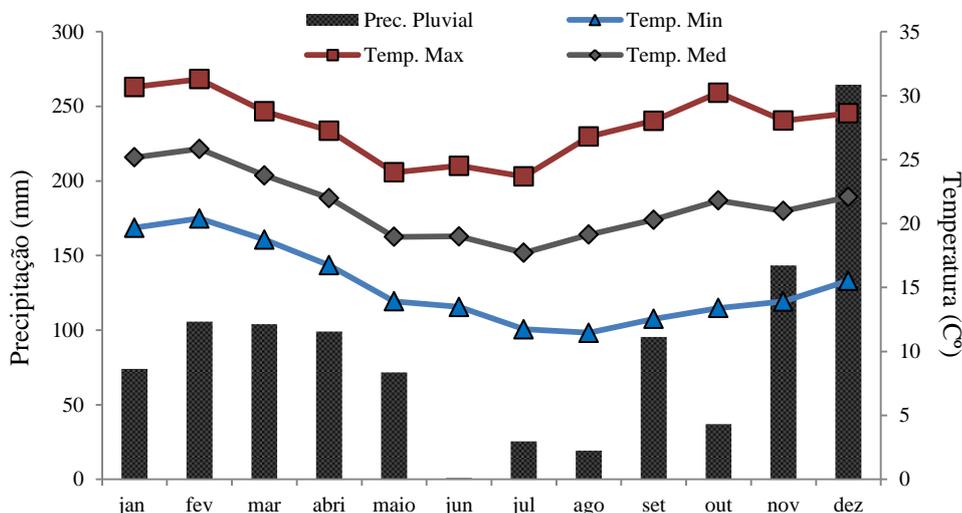


Figura 17 – Temperatura e precipitação média mensal no período entre meses de abril de 2013 a dezembro de 2013.

## 15.2 Fontes utilizadas no experimento

As fontes de fertilizantes fosfatadas utilizadas no experimento foram dois rejeitos da produção de fertilizantes fosfatados, fosfato precipitado 1 (FP1) e fosfato precipitado 2 (FP2), comparados ao superfosfato triplo, além de um fosfato natural reativo de origem sedimentar e orgânico, formado pela deposição e posterior decomposição de restos de animais marinhos.

A amostragem e determinação das características dos materiais fosfatados seguiram metodologia descrita em Laboratório Nacional de Referência Vegetal - LANARV (BRASIL, 1983), e realizadas no Laboratório de Fertilizantes e Corretivos do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA/UNESP de Botucatu, SP (Tabelas 19 e 20).

Tabela 19. Características dos materiais fosfatados

Amostras	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -T	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -AC	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -CNA	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Ag	K <sub>2</sub> O	S-SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	----- % -----												
FP1	9,10	2,62	3,53	0,00	0,00	3,60	24,76	0,23	0,00	1,05	0,03	0,05	0,08
FP2	14,40	5,97	11,68	0,00	0,00	2,50	15,00	0,34	0,01	3,29	0,08	0,08	0,07
Fosfato reativo	29,40	6,87	5,77	0,00	0,04	2,36	32,60	0,33	0,02	0,39	0,00	0,06	0,09
Super Triplo	48,08	17,04	45,07	37,34	0,00	4,40	13,10	0,26	0,02	1,79	0,07	0,08	0,02

T – Total; AC – Ácido Cítrico a 2% Rel-1:100; CNA - Citrato neutro de amônio+água; Ag – água

Tabela 20. Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas (%).

Fontes <sup>(1)</sup>	Material passante na peneira de 4 mm <sup>(2)</sup>	Material passante na peneira de 1 mm <sup>(3)</sup>
FP1	100	99,26
FP2	88,43	58,17
FNR	100	99
SFT	74,63	6,35

<sup>(1)</sup>FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FNR: Fosfato Reativo e SFT: Super Fosfato Triplo. <sup>(2)</sup>ABNT 5; <sup>(3)</sup>ABNT 18.

### 15.3 Delineamento experimental e tratamentos utilizados

O experimento foi conduzido em blocos ao acaso, em esquema fatorial 3 x 5, com 4 repetições, totalizando-se 60 parcelas, com 30 m<sup>2</sup> cada. Os tratamentos foram compostos de quatro fontes de fertilizantes fosfatados: fosfato precipitado 1 (FP1), fosfato precipitado 2 (FP2), fosfato natural reativo e superfosfato triplo, além do tratamento sem aplicação de fósforo. O outro fator correspondeu a 3 condições de acidez, V% original do solo, V% intermediário (45) e V% corrigido (60) (Tabela 21). Foram aplicados 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> correspondendo a uma única dose de cada fonte, de acordo com as recomendações para a cultura, (RAIJ et al., 1997).

Tabela 21. Tratamentos utilizados no experimento.

Fontes		V (%)
Fosfato precipitado 1 (FP1)	x	original, intermediário e corrigido
Fosfato precipitado 2 (FP2)	x	original, intermediário e corrigido
Fosfato reativo	x	original, intermediário e corrigido
Superfosfato triplo	x	original, intermediário e corrigido
Sem P	x	original, intermediário e corrigido

### 15.4 Condução do experimento

Inicialmente foi realizado o preparo convencional na área (aração/gradagem) e posteriormente a formação das unidades experimentais (60 parcelas) de 30m<sup>2</sup> cada. Após o preparo da área foi realizada a calagem, respeitando as doses de calcário para cada condição específica de V% (original, 45 e 60 V%), correspondentes a 0, 2,8 e 4,3 t ha<sup>-1</sup> respectivamente, com calcário dolomítico, incorporados à camada de 20 cm.

A semeadura e a aplicação dos fertilizantes foram realizadas 30 dias após a aplicação do calcário de acordo com as recomendações para a cultura, descritas no Boletim Técnico 100 (RAIJ et al., 1997). As plântulas emergiram dia 20 de abril de 2013. A adubação de cobertura foi realizada 30 dias após a emergência das plantas com sulfato

de amônio na dose de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N, de acordo com as recomendações para a cultura, (RAIJ et al., 1997).

### 15.5 Parâmetros avaliados no solo

Foram realizadas amostragem de solo, sendo as coletas realizadas ao final de cada ciclo de crescimento das plantas e no momento da colheita. As amostras foram secas ao ar, seguindo-se do peneiramento das mesmas em malha de 2 mm, sendo em seguida acondicionadas para posterior análise no Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA/UNESP de Botucatu. Foram determinados os seguintes parâmetros: pH em CaCl<sub>2</sub>, matéria orgânica, P<sub>resina</sub>, K, Ca, Mg e S trocáveis e, calculada a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação por bases (V%), além dos teores de micronutrientes, conforme metodologia descrita por Raij et al. (2001).

### 15.6 Capacidade máxima de adsorção de fósforo

A capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) do solo foi determinada na primeira amostragem antes do início do experimento a fim de conhecer o quanto o fator adsorção poderia influenciar na eficácia de cada fonte testada. Para tal, foram retiradas amostras de solo de 0-20 cm para determinação do P remanescente (P-rem).

O fósforo P-rem foi determinado após agitação de 2,5 cm<sup>3</sup> de cada amostra de solo durante cinco minutos com uma solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, 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, representou o valor do P-rem. As concentrações de P utilizadas para o ajuste das isotermas de adsorção de Langmuir foram baseadas nos valores de P-rem encontrados o solo de acordo com a metodologia proposta por Alvarez V. et al. (2000) presentes na Tabela 22.

Tabela 22. Valores de P-rem, níveis e intervalo para doses de P para determinação da capacidade máxima de adsorção de P.

Solo	P-rem	Intervalo	Doses de P CMAP
	mg L <sup>-1</sup>	-----mg L <sup>-1</sup> -----	
LVd	13,9	0-150	0; 7,5; 15; 22,5; 37,5; 52,5; 67,5; 82,5; 105; 127,5; 150

P-rem = Fósforo remanescente, Alvarez V. et al. (2000)

Foram pesadas amostras de solo correspondentes a um volume de 2,5 cm<sup>3</sup> e adicionadas em recipiente plástico de 200 mL. Em seguida, adicionou-se 25 mL da solução de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>, contendo P de acordo com as concentrações presentes na Tabela . Após agitação horizontal por 24 horas, as suspensões foram centrifugadas a 3.000 rpm durante cinco minutos e, em seguida, filtradas. O teor de P na solução de equilíbrio (sobrenadante) foi determinado por colorimetria (BRAGA; DEFELIPO, 1974). A quantidade de P adsorvida ao solo foi estimada pela diferença entre a quantidade de P encontrado na solução de equilíbrio e a quantidade de P adicionado, sendo esse processo feito em triplicata. A partir dos dados obtidos em triplicata, foram construídas isotermas de adsorção de Langmuir, plotando-se a quantidade de P adsorvida ao solo (Q) na ordenada e a concentração de P na solução de equilíbrio (C) na abcissa. A forma hiperbólica da equação de Langmuir é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{X}{m} = \frac{(a+b+c)}{(1+a.c)}$$

Em que x/m é a quantidade de P adsorvido ao solo em mg P(x)/g solo (m); b é a CMAP do solo (mg g<sup>-1</sup>) de P no solo; C é a concentração de P na solução de equilíbrio (sobrenadante) (mg L<sup>-1</sup>); e a é a constante relacionada com a energia de adsorção do elemento ao solo (L mg<sup>-1</sup>) (OLSEN e WATANABE, 1957). As constantes a e b foram estimadas através da equação linear de Langmuir, obtida pela transformação da equação hiperbólica, que corresponde a: C/x/m = 1/ab + C/b.

### 15.7 Parâmetros avaliados na planta

Foram considerados quatro ciclos de corte para a cultura, sendo cada ciclo de aproximadamente 60 dias de crescimento após a emergência e/ou rebroto. Em cada corte foram avaliados os parâmetros de produção: altura de plantas, número de folhas e número de perfilhos. Para a amostragem da disponibilidade total da pastagem, foram lançados casualmente 2 quadrados (0,5m × 0,5m), por parcela e todo material contido foi cortado rente ao solo, aproximadamente a 5 cm do solo, conforme descrito por McMeniman (1997).

Para determinação dos teores de macronutrientes e micronutrientes foram coletadas a parte aérea das plantas, em cada parcela, totalizando 4 amostragens (ao final de cada ciclo e momento da colheita). As folhas foram submetidas à lavagem rápida com água destilada e colocadas para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60–70° C, por 72 horas, sendo em seguida moídas em moinho tipo Willey.

Considerando os resultados de cada corte e, também, os resultados acumulados ao final dos quatro cortes avaliativos, foi determinado o acúmulo de P, obtido por meio do produto entre o teor de P e a produção de massa seca nos respectivos componentes da planta.

### **15.8 Índice de Eficiência Agronômica (IEA)**

O IEA foi calculado com base no diferencial de produção obtido entre os fosfatos em teste e o superfosfato triplo, considerando-se tanto a produção média de matéria seca da parte aérea como a quantidade de fósforo acumulado pela parte aérea (Büll et al., 1997).

$$\text{IEA} = \frac{(\text{Produção com fosfato testado} - \text{produção sem P})}{(\text{Produção com super triplo} - \text{produção sem P})} \times 100$$

### **15.9 Análise estatística**

As variáveis analisadas foram submetidas à análise de variância (teste F), através do programa Sisvar 4,2; as diferenças significativas das variáveis qualitativas tiveram as médias comparadas pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

## **16. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Foram verificadas diferenças significativas no nível de 1% de probabilidade para solos em relação ao pH do solo, teor de P no solo, altura de planta, ao número de perfilhos e de folhas, teor de P na planta, massa de matéria seca e no acúmulo de P na planta.

### **16.1 Capacidade máxima de adsorção de fósforo**

Nos solos da região tropical, é importante determinar a capacidade de fixação de fósforo, pois é um dos fatores que governa a disponibilidade do elemento na solução do solo, a dissolução de fertilizantes e, conseqüentemente, a absorção pelas culturas (SANCHES; UEHARA, 1980).

Observa-se que a isoterma de adsorção de P correspondente ao solo onde foi conduzido o experimento demonstrou que a quantidade de fósforo adsorvida, aumentou com a concentração de P na solução de equilíbrio, inicialmente de forma mais intensa, entretanto, nota-se redução na quantidade de P adsorvido quando se utilizou a dose mais elevada de P na solução de equilíbrio (Figura 18). Esse comportamento é

semelhante aos que foram verificados por Falcão e Silva (2004) em trabalho realizado com Latossolos e Argissolos.

As formas das isotermas são características da adsorção química de uma monocamada aniônica, pela fase sólida adsorvente do solo, concordando com Barrow (1961). Na fase inicial de rápida adsorção de P no solo, há uma atração eletrostática inicial (Barrow, 1985), seguida pela adsorção por oxidróxidos, por meio de troca de ligantes (Parfitt, 1978; Barrow, 1985; Sanyal & De Datta, 1991). Segundo Novais e Smyth (1999), nessa reação, denominada quimiossorção, há troca de ligantes, como OH<sup>-</sup>, da superfície dos óxidos, por fosfato da solução. É uma ligação predominantemente covalente ao contrário do NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou do Cl<sup>-</sup>, adsorvidos por atração eletrostática (Parfitt et al., 1975; Parfitt, 1978).

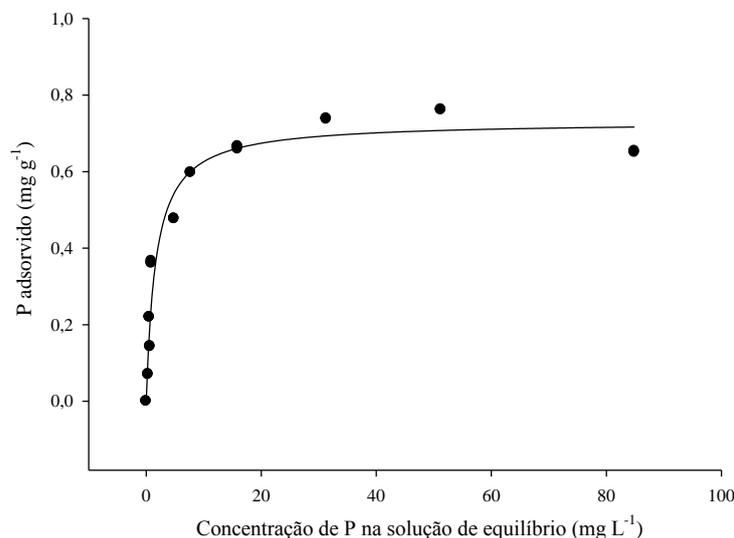


Figura 18. Ajuste do modelo hiperbólico da isoterma de adsorção de Langmuir para as doses P estudadas em um LATOSSOLO Vermelho distrófico.

A CMAP revela o que poderá ocorrer com o P adicionado ao solo para as culturas, em termos de aproveitamento e, também, para utilização posterior pelas plantas, constituindo-se no que se denomina de “efeito residual” (Pereira & Faria, 1998). Segundo Woodruff & Kamprath (1965), o valor da CMAP de solos tem sido usado como uma estimativa da quantidade desse nutriente requerida pelos solos para condicionar o crescimento máximo das plantas.

Os valores encontrados para  $P_{rem}$  estão apresentados na Tabela 23 e demonstram que este solo tem alta capacidade de adsorção de P, de acordo com os critérios apresentados por Alvarez V. et al. (2000). Observa-se também que pelos níveis críticos de fósforo e, conseqüentemente, a porcentagem de fósforo relativo nesse solo, é

classificado como muito baixo, o que leva a considerar que a disponibilidade de P na solução, adicionado via fertilizante, pode ser diminuída devido a alta capacidade de adsorção que este solo possui. A determinação do  $P_{rem}$  auxilia na interpretação da disponibilidade de P e o seu nível crítico no solo. Este parâmetro é importante já que quando o teor de P no solo é muito baixo, o rendimento esperado das culturas é baixo pela deficiência do nutriente. Conforme são adicionados fertilizantes fosfatados, o rendimento das culturas aumenta em resposta ao incremento nos teores de P no solo.

Nota-se que a capacidade de adsorção de fósforo nesse solo é alta em razão principalmente da maior presença de argila e elevada CTC. Essa quantidade de P adsorvida está coerente com o valor obtido para o  $P_{rem}$  de  $13,9 \text{ mg dm}^{-3}$ , caracterizando-se como um solo com grande capacidade de adsorver P. Este comportamento pode influenciar significativamente na eficiência do uso de fósforo pelas plantas quando este nutriente essencial é disponibilizado por diferentes fontes de fósforo. Os coeficientes de determinação obtidos a partir das equações linearizadas das isotermas de Langmuir indicam que o modelo matemático foi significativamente eficiente na quantificação de P adsorvido no solo estudado, corroborando com Pereira e Faria (1998).

Tabela 23. Parâmetros de isoterma de Langmuir estimados por meio de ajustes de regressão linear para os solos estudados.

Solos	Equação de Langmuir	R <sup>2</sup>	P-rem mg dm <sup>-3</sup>	CMAP mg kg <sup>-1</sup>	a L mg <sup>-1</sup>	Nível crítico de P mg dm <sup>-3</sup>	P relativo %	
							Melich	Resina
Pin	$C/q = 1,42C + 1,59$	0,99**	13,9	705,47	0,891	9,44	15,9	53

P-rem=Fósforo remanescente; CMAP=Capacidade máxima de adsorção de fósforo; a=energia de ligação

Observa-se que o P relativo deste solo difere em relação aos extratores utilizados. Ao utilizar o extrator Mehlich 1 a porcentagem de fósforo relativo é menor que o extrator resina, 15,9 e 35,9% respectivamente. Indicando que dependendo do extrator o uso do índice de P relativo de um solo como base para a utilização de um determinado fertilizante pode ser diferente.

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, a resina extrai mais fósforo em relação ao extrator Mehlich 1. 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, 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).

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, Brito Neto (2011) observou que o extrator Mehlich-1 foi mais eficiente na extração de P, em relação à resina trocadora de íons. 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. Portanto a obtenção de P relativo maior ou menor por extratores diferentes não significa que as plantas apresentarão deficiências de P, pois esta capacidade também é definida pela espécie cultivada, e no caso de cultivo de plantas de cobertura como a *Urochloa* é conhecida a tolerância da espécie em condições de baixa fertilidade.

## 16.2 pH do solo

Ao comparar os tratamentos, verifica-se que para a variável pH do solo, não houve interação significativa entre os níveis de V% e fontes de P em todos os cortes realizados (Figura 19).

Nota-se maior aumento do pH do solo conforme há o aumento da saturação de bases, devido à maior dose de corretivo utilizada, o que era esperado já que, sabe-se que existe correlação positiva entre o aumento do V% e o pH do solo.

Nota-se também que logo após a colheita das plantas o pH do solo diminuiu, sendo determinados, logo após o primeiro corte, pH em  $\text{CaCl}_2$  4,1, no tratamento onde a condição de V% era a original do solo ou aproximadamente 11%, tratamento este em que não foi realizada a correção da acidez e conseqüentemente sem adição de calcário antes da aplicação das fontes de P e da sementeira da *Urochloa*. No tratamento com o V% de 45, condição intermediária, o pH observado foi de 4,6 e na condição de V% corrigido ou 60%, recomendado para cultura, o pH observado foi de 5,1. Após o segundo corte das plantas, o pH observado foi 4,1, 4,5 e 4,8 para os tratamentos onde a condição de V% foi a original do solo, intermediária e corrigido, respectivamente. Posteriormente, logo após a realização do 3º corte das plantas o pH determinado no solo foi de 4,1, 4,5 e 4,7 e por fim, logo após o último e 4º corte das plantas o pH observado

foi de 4,0, 4,5 e 5,0 respectivamente para os tratamentos onde a condição de V% foi a original do solo, intermediária e corrigido.

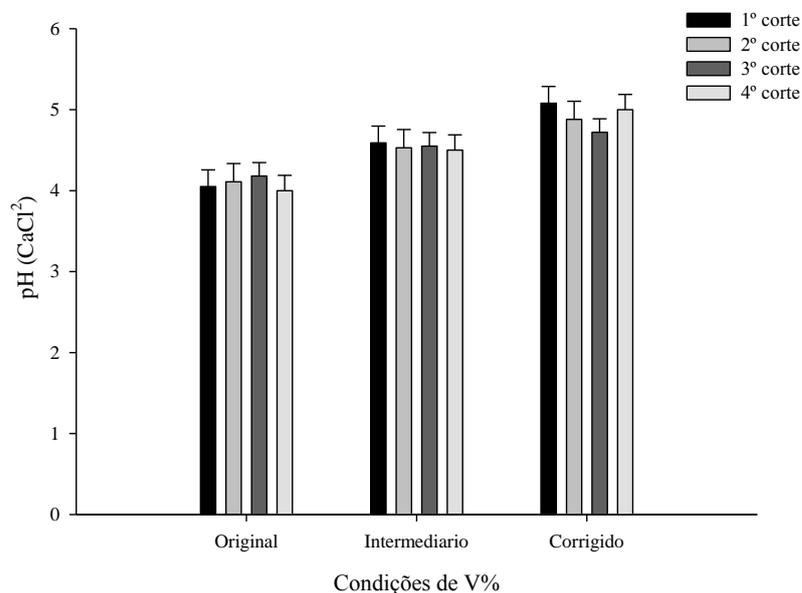


Figura 19. pH (CaCl<sub>2</sub>) em LATOSSOLO Vermelho distrófico em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinado após a colheita das plantas.

Verificou-se que durante todo o período de condução do experimento essa condição se manteve logo após todos os cortes realizados. Observou-se que o pH do solo diminuiu, caracterizando uma condição de solo ácido mesmo onde havia sido feito a correção do solo anteriormente a aplicação das fontes de P. Isso aconteceu devido, principalmente, ao uso de fertilizantes nitrogenados, na forma de sulfato de amônio, utilizados em cobertura e também possivelmente devido à atividade da fosfatase ácida na rizosfera do capim marandu, como observou Janegitz et al, (2013), ao avaliar as transformações do P durante o cultivo da braquiária e do tremoço-branco, que em conjunto contribuíram para a diminuição do pH do solo. Contudo, Gomes et al., (1997) e Prado (1999), verificaram que a redução da saturação por bases e do pH parece não constituir um grande problema na produção de biomassa da *Urochloa*, provavelmente porque, em ambiente onde ocorre grande retorno de material orgânico na superfície do solo, pode haver neutralização do alumínio trocável por complexação com moléculas orgânicas (Miyasawa et al., 1993; Peixoto et al., 1997).

Franchini et al. (2001) afirmam que as espécies de cobertura como a *Urochloa* proporcionam aumentos da concentração de ácidos orgânicos na camada superficial do solo, que podem beneficiar a ação da calagem pela liberação de ácidos

orgânicos de baixo peso molecular, durante a decomposição dos resíduos vegetais. Esses compostos são capazes de complexar o Al tóxico e aumentar a mobilidade dos produtos originados da dissolução do calcário, no perfil do solo.

Verificou-se que não houve interação entre as fontes de fósforo e o pH da solução do solo. Entretanto, sabe-se que em condições de acidez elevada como foi o caso de alguns tratamentos onde não houve adição de calcário, em pH caracterizado ácido, há predominância de fosfatos de ferro e alumínio (LINDSAY et al., 1989; JAYACHANDRAN et al., 1989), como consequência, a adsorção de P é maior com baixos valores de pH.

Outro fator importante a ser considerado é que é reconhecida a importância ecológica e agronômica de se considerar o pH onde as plantas vão crescer e se reproduzir, uma vez que esse fator exerce influência direta no desenvolvimento das plantas. Reddy & Dunn (1987) afirmam que a acidez dos solos está entre os fatores que mais limitam o crescimento das plantas em solos tropicais. Contudo o capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) vem sendo a gramínea forrageira com maior potencialidade para cultivo. Sua indicação tem se baseado na capacidade que esta espécie apresenta para vegetar satisfatoriamente nos solos ácidos e de baixa fertilidade, característicos da região (Ruiz et al., 1995; Souza Filho et al., 1992; Simão Neto et al., 1995).

### **16.3 Teor de P no solo**

Ao estudar isoladamente a variável teor de P no solo, observa-se interação entre os fatores fonte de fósforo e condições de V% do solo após todos os cortes realizados (Figura 20).

Observa-se que o P disponível no solo foi elevado de maneira expressiva com a aplicação das fontes de fósforo quando comparado ao tratamento controle com maior disponibilidade do elemento onde houve correção da acidez em todas as épocas de determinação. Em geral tanto a fonte solúvel como as fontes alternativas de fosfato, com exceção do fosfato natural reativo (FNR), puderam satisfazer a exigência mínima de P, acima do considerado teor crítico de P ( $9,44 \text{ mg dm}^{-3}$ ) para este tipo de solo onde foi conduzido o experimento.

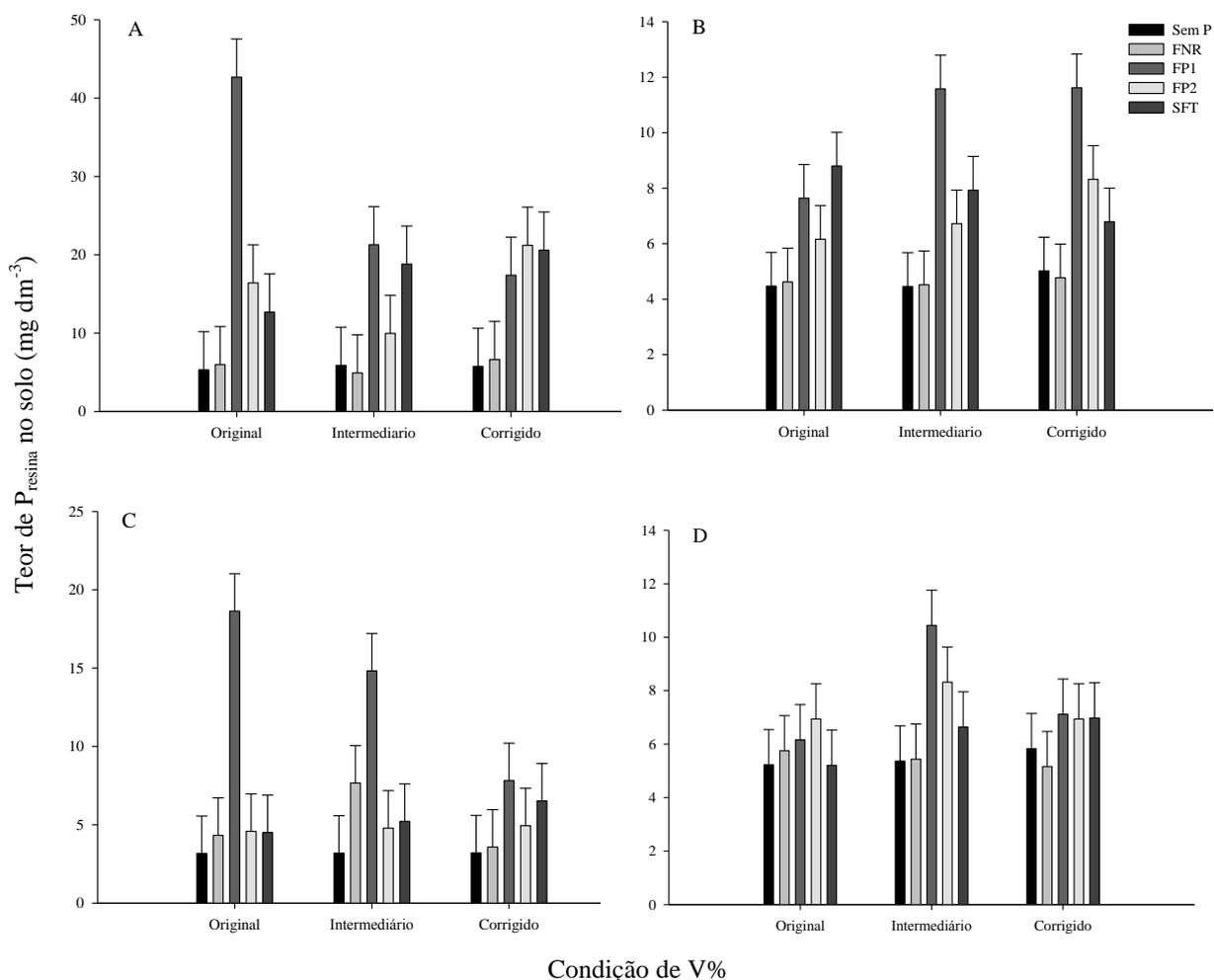


Figura 20. Teor de  $P_{resina}$  em LATOSSOLO Vermelho distrófico em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinado após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte.

Nota-se que não houve aumento considerável do teor de P no solo pelo FNR, em todas as épocas em que foi determinado o  $P_{resina}$ , nem mesmo nos tratamentos onde não houve correção da acidez, já que sua solubilização é maior em condições de solo ácido. Este comportamento discorda de Foloni et al., 2008 que observou aumento expressivo do P disponível no solo com a aplicação do fosfato natural, apresentando ajustes lineares de acordo com o aumento das doses de fosforita.

Contudo é conhecido que plantas de cobertura como as braquiárias são consideradas plantas capazes de vegetar em solos com baixos teores de P disponível, isto é, são mais eficientes na utilização do P disponível do solo. Entretanto, em condições de média a alta concentração de P na solução do solo, há aumento da produção de massa de matéria seca como afirmam Oliveira et al. (2007) que concluíram que a baixa disponibilidade do P é um dos fatores mais restritivos para a pecuária, uma vez que as

plantas forrageiras podem ser muito exigentes em P, em virtude de uma maior produção de biomassa, conseqüente à maior extração e exportação desse nutriente.

Contudo, dada a lenta liberação do P dos fosfatos naturais, é de se esperar que esses fosfatos sejam mais eficientes para cultivos de plantas perenes, como as forrageiras que não necessitam de elevados teores de P disponível num curto espaço de tempo. Porém observa-se que para as condições do experimento a fonte alternativa FP1 proporcionou em média os maiores teores de P disponível no solo quando comparada às demais e inclusive à fonte de referência superfosfato triplo (SFT).

Observa-se também que a fonte FP1 proporcionou inicialmente, ou seja, logo após o primeiro corte, os maiores teores de P disponível,  $42,68 \text{ mg dm}^{-3}$  no solo em condições onde não houve correção da acidez. Posteriormente nos demais cortes, essa mesma fonte foi a que proporcionou os maiores teores de P disponível, com maiores concentrações em condições de acidez elevada ou intermediária. Em condições de acidez corrigida esta mesma fonte foi superior às demais apenas no segundo corte e posteriormente se manteve semelhante ao SFT e à fonte FP2. Este comportamento é explicado pela maior solubilidade desta fonte em condições onde o pH é ácido além de apresentar efeito residual maior que as demais, já que houve maior liberação de P pela mesma após todos os cortes realizados, o que sugere ser uma fonte com características adequadas para utilização em pastagens, cultura perene que geralmente são cultivadas em condições de baixa fertilidade e altos níveis de acidez.

#### **16.4 Altura de plantas**

Os valores médios de altura de planta foram diretamente influenciados pela aplicação das fontes de fósforo e das diferentes condições de acidez no primeiro, terceiro e quarto corte. Apenas na segunda época de colheita, não foi observada interação entre as fontes de fósforo e os diferentes níveis de V% (Figura 21).

Observa-se na Figura 22 que no primeiro corte a fonte solúvel SFT proporcionou maior altura de planta quando comparada as demais fontes em condições de acidez corrigida, pelo fato de que esta fonte por ser um fertilizante fosfatado acidulado, tem maior eficiência de liberação de P em condições de pH moderadamente ácido ou próximos da neutralidade. Entretanto, ao comparar os tratamentos, nota-se que a fonte alternativa FP1 nos dois primeiros cortes e em condições de V% intermediário proporcionou maiores valores de altura de plantas (40 cm) que o SFT (32,7cm) em condições de V% corrigido. Pode-se inferir que para esta característica o FP1 foi mais

eficiente que a fonte de referência, já que é possível se obter maior altura da pastagem com o uso de doses menores de corretivos.

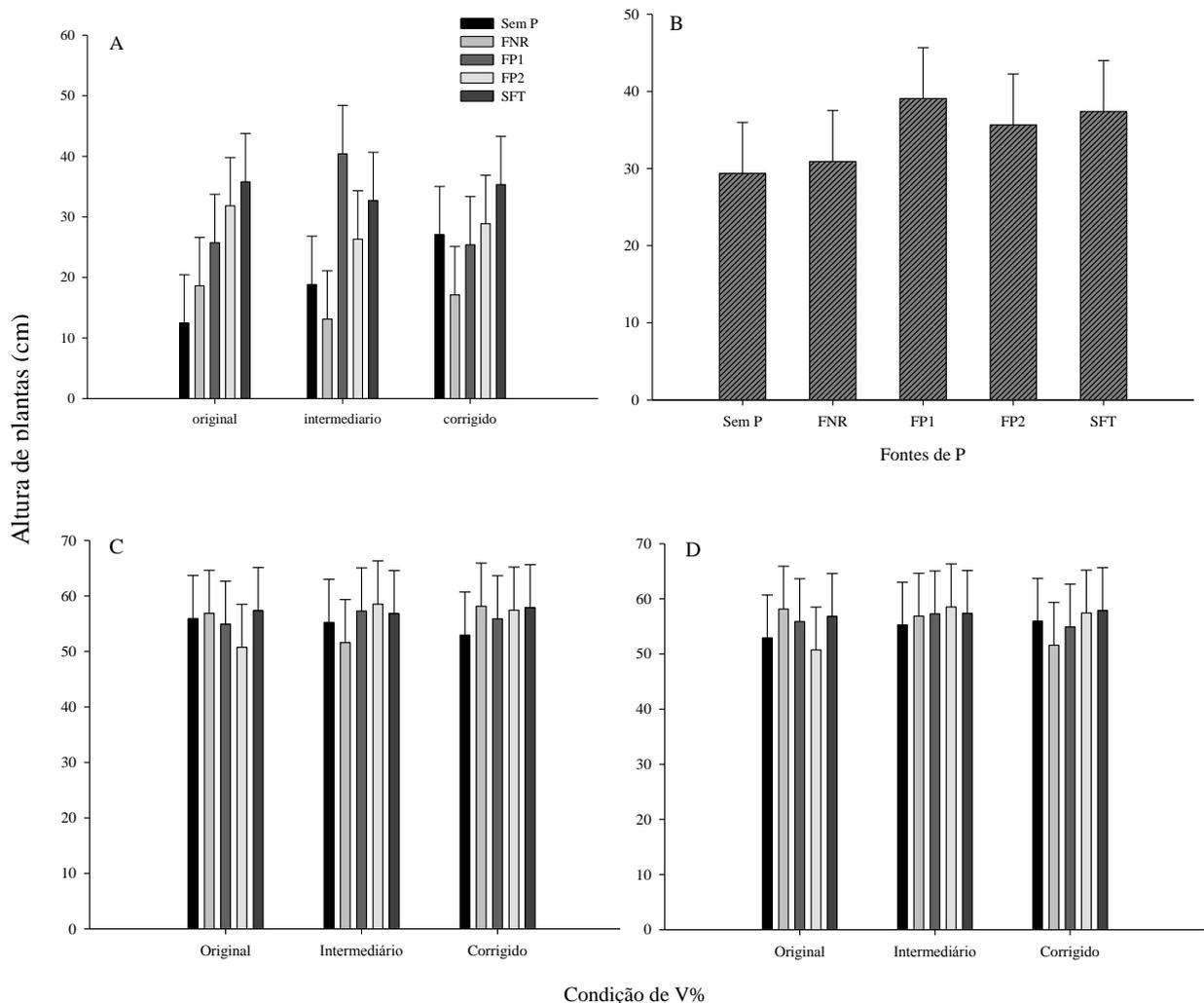


Figura 21. Altura de plantas em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte.

No primeiro corte a fonte solúvel SFT proporcionou maior altura de planta quando comparada as demais fontes em condições de acidez corrigida, pelo fato de que esta fonte por ser um fertilizante fosfatado acidulado, tem maior eficiência de liberação de P em condições de pH moderadamente ácido ou próximos da neutralidade. Entretanto, ao comparar os tratamentos, nota-se que a fonte alternativa FP1 nos dois primeiros cortes e em condições de V% intermediário proporcionou maiores valores de altura de plantas (40 cm) que o SFT (32,7cm) em condições de V% corrigido. Pode-se inferir que para esta característica o FP1 foi mais eficiente que a fonte de referência, já que é possível se obter maior altura da pastagem com o uso de doses menores de corretivos.

Nos demais cortes não é possível notar diferença significativa em relação à altura das plantas. Todas as fontes de fósforo utilizadas obtiveram comportamento semelhante nos diferentes níveis de acidez do solo. Todas as fontes promoveram maior altura de plantas em relação à testemunha, sendo a adubação é um fator responsável pela elevação precoce dos meristemas apicais das gramíneas (FONSECA et al., 1998).

A presença de fósforo na solução do solo, em quantidades adequadas, favorece o crescimento das plantas, visto que este elemento atua na síntese e degradação de macromoléculas, além de ser fonte de energia para o metabolismo da planta, por meio do ATP (FAQUIN, 2005). A nutrição adequada de P favorece o crescimento vegetal. Desse modo, a altura de plantas pode ser considerada uma excelente estimativa para a predição do crescimento inicial de plantas forrageiras, sendo, tecnicamente, uma boa medida do potencial de desempenho produtivo das espécies forrageiras como capim *Urochloa brizantha*.

### 16.5 Número de perfilhos

Observa-se que para o perfilhamento da *Urochloa brizantha* houve interação significativa entre as fontes de fósforo utilizadas e os níveis de V% em todos os cortes realizados (Figura 22). Nota-se que em condições de solo ácido, sem correção, na primeira época de colheita, as fontes alternativas FP1 e FP2 proporcionaram o número de perfilhos por m<sup>2</sup> de 398 e 356, respectivamente semelhante à fonte de referência SFT que foi de 410. O FP2 também proporcionou incremento significativo no número de perfilhos (371) no primeiro corte, no V% de 60, superando todas as demais fontes, inclusive a fonte de referência o SFT.

Observa-se também que nos dois últimos cortes e em condições de solo mais ácido a fonte FNR proporcionou número de perfilhos semelhantemente à fonte FP1, 632 e 712 respectivamente, entretanto para tais condições onde não houve correção da acidez, a fonte FP2 foi a que apresentou maiores índices em relação à produção de número de perfilhos por m<sup>2</sup>, 877. Contudo quando, observa-se o tratamento com V% intermediário, nota-se que ao longo do tempo a fonte FP1 obteve maior número de perfilho por m<sup>2</sup> quando comparadas às demais fontes, demonstrando, contudo, que para esse tipo de característica de produção da gramínea, essa fonte possui efeito residual maior, pois ainda libera fósforo para solução ao longo do tempo. Nota-se maior eficiência

das mesmas em condições de solo ácido, o que pode ser um aspecto positivo, já que tais fontes podem ser usadas em condições de baixa fertilidade natural e baixa acidez como foi o caso do solo estudado no experimento. Em condições de acidez corrigida, ou seja, no V% de 60 houve redução no número de perfilhos, o que pode ter ocorrido pelo maior crescimento da planta em altura, causando assim maior competição e redução no número de perfilhos.

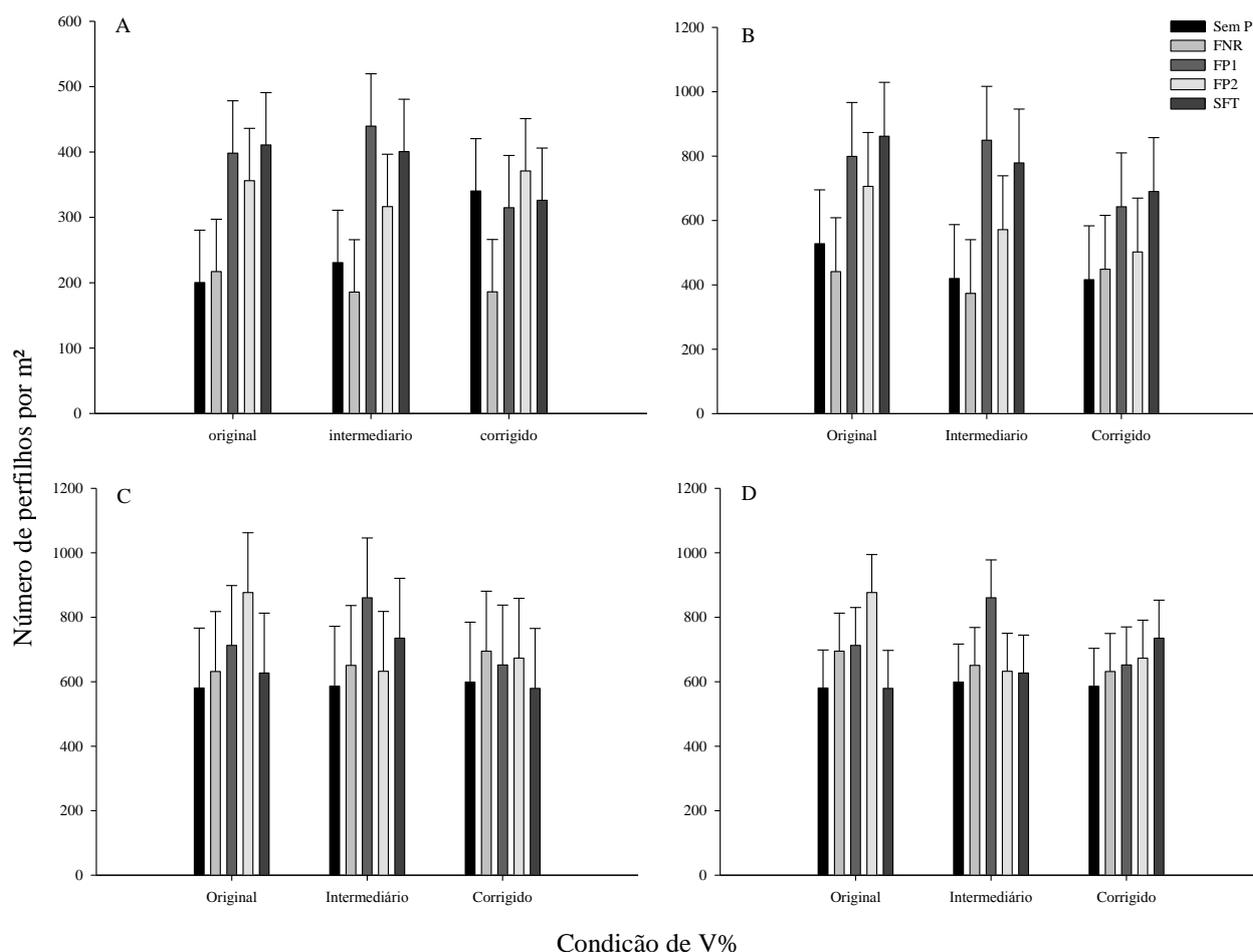


Figura 22. Número de perfilhos em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte.

O aumento crescente do número de perfilhos a cada corte pode ser explicado pelo estresse sofrido pela forrageira após o corte o que promove a indução das gemas basais originando assim novos perfilhos (GUEDES et al., 2009). Outro fator importante é o aumento da intensidade luminosa que alcança as gemas basais promovendo a quebra de dominância apical (LANGER, 1974; BATISTA; MONTEIRO, 2006). Esses resultados evidenciam a importância da adubação com fósforo para essa cultivar, pois o

perfilhamento é importante para as gramíneas, o que assegura a perenidade das pastagens, além de contribuir com o incremento de forragem.

O fato do P estar ligado diretamente à divisão celular reflete a sua importância nos processos morfogênicos das plantas forrageiras, sobretudo na sua fase inicial de formação, visto que esses processos influenciam diretamente as características estruturais do pasto, formando seu índice de área foliar e bom perfilhamento, o que representará o componente disponível diretamente para o pastejo.

Werner (1986), ressalta que o fósforo afeta o desenvolvimento inicial das plantas recém-germinadas, favorecendo o crescimento das raízes, estimulando o perfilhamento e emissão de estolões. Este nutriente ainda é essencial para divisão celular, devido ao seu papel na estrutura dos ácidos nucléicos (WHITEBEAD, 2000).

## 16.6 Número de folhas

Observa-se que para o número de folhas da *Urochloa brizantha* houve interação significativa entre as fontes de fósforo utilizadas e os níveis de V% no primeiro, terceiro e quarto corte. No segundo corte não houve interação entre os fatores fontes e condições de V%, entretanto, analisando-os isoladamente, nota-se que houve diferença entre as fontes em relação ao número de folhas do capim marandú (Figura 23). Novamente, como para o número de perfilhos, o V% de 45 proporcionou o melhor rendimento de folhas em todas as fontes utilizadas.

Observa-se que no terceiro corte a fonte alternativa, FP1 proporcionou os maiores valores (3441) quando comparadas com a fonte de referência SFT (2584), o que mostra mais uma vez a pronta disponibilidade de P fornecida por esta fonte tanto inicialmente, quanto a longo prazo.

Já o FNR proporcionou incremento no número de folhas a partir da terceira época de colheita sendo o maior número apenas no quarto e último corte (2630) e em condições de solo ácido, onde a solubilidade do fosfato natural é maior, o que mostra que a maior eficiência de uso de fósforo pela planta para este tipo de fonte acontece ao longo do tempo, já que a solubilidade da mesma é mais lenta e maior em condições de acidez não corrigida.

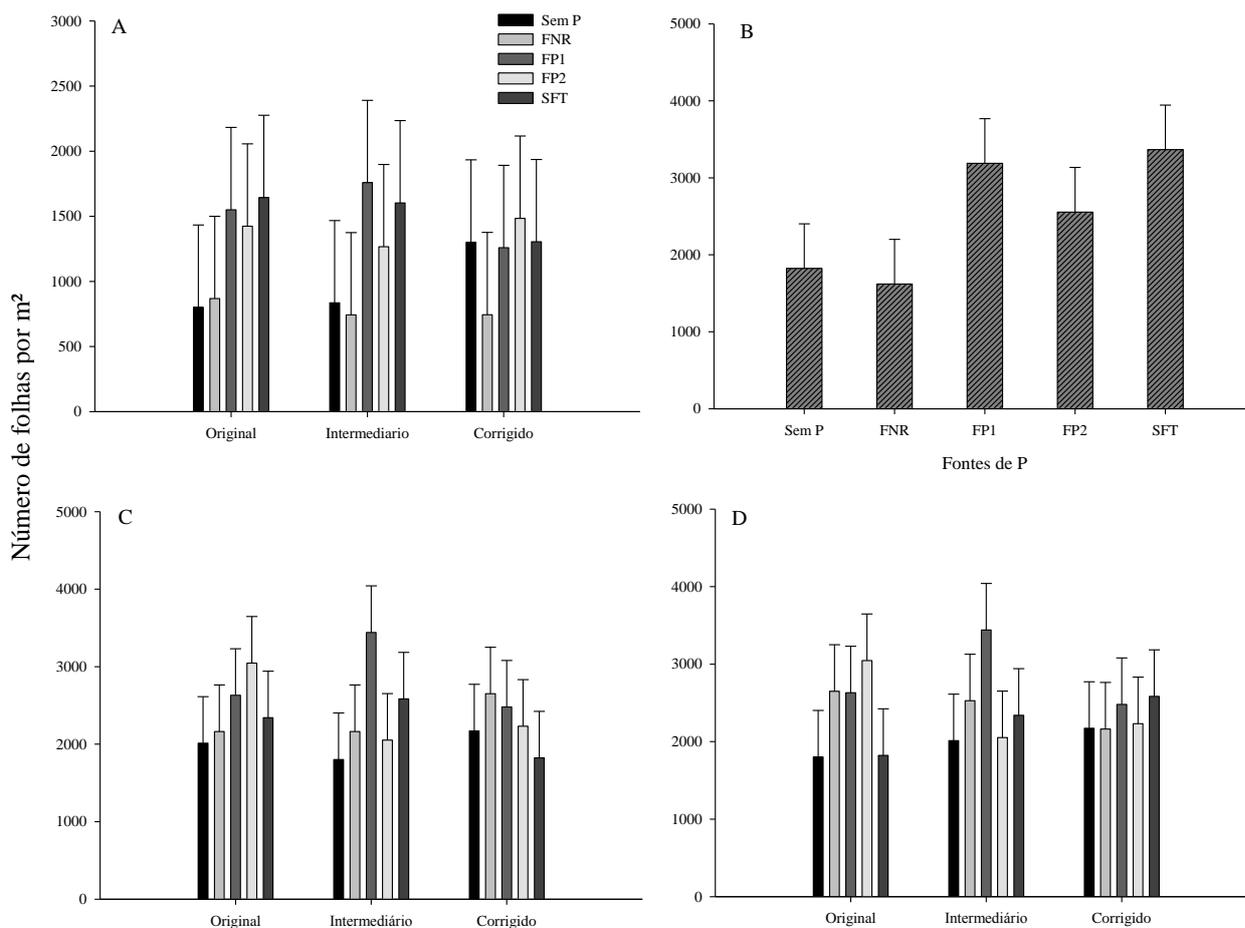


Figura 23. Número de folhas em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte.

Pode-se observar que o P promoveu diferença em todos os tratamentos. Isso indica que o P está diretamente relacionado a uma maior produção de folhas e, conseqüentemente, uma maior qualidade de forrageira, resultados que corroboram com Camacho et al., (2015) que ao avaliarem a produção de biomassa e a eficiência agrônômica em função do fornecimento de fósforo em diferentes genótipos de *Urochloa brizantha* observaram que a adubação fosfatada promove aumento na produção de biomassa de folhas. Esses resultados demonstram que as fontes alternativas e o fosfato natural reativo propiciou o desenvolvimento do capim Marandu, uma vez que a expansão de folhas é um aspecto adequado ao bom desenvolvimento de gramíneas (BONFIM SILVA et al., 2011).

### 16.7 Teor e Acúmulo P na planta

Houve interação entre os fatores fontes de fósforo e condições de V% apenas no primeiro corte, para às demais épocas de colheita não foi observada

diferença entre as condições de acidez. Entretanto ao analisar isoladamente os fatores nota-se diferença entre as fontes de fósforo para o segundo, terceiro e quarto corte do capim marandú (Figura 24).

Observa-se que no primeiro corte em condições de acidez intermediária a fonte FP1 proporcionou o maior teor de P na planta, enquanto que em condições de acidez corrigida às fontes FP2 e o SFT proporcionaram o maior teor. Nota-se que em condições de acidez intermediária a fonte FP1 foi superior a todas as outras, inclusive à fonte solúvel. Isso pode ter ocorrido possivelmente pela rápida solubilidade do P presente no SFS, o que implicou na maior interação com os argilominerais do solo, que já possui capacidade alta de adsorção de fósforo, reduzindo a eficiência de absorção do P.

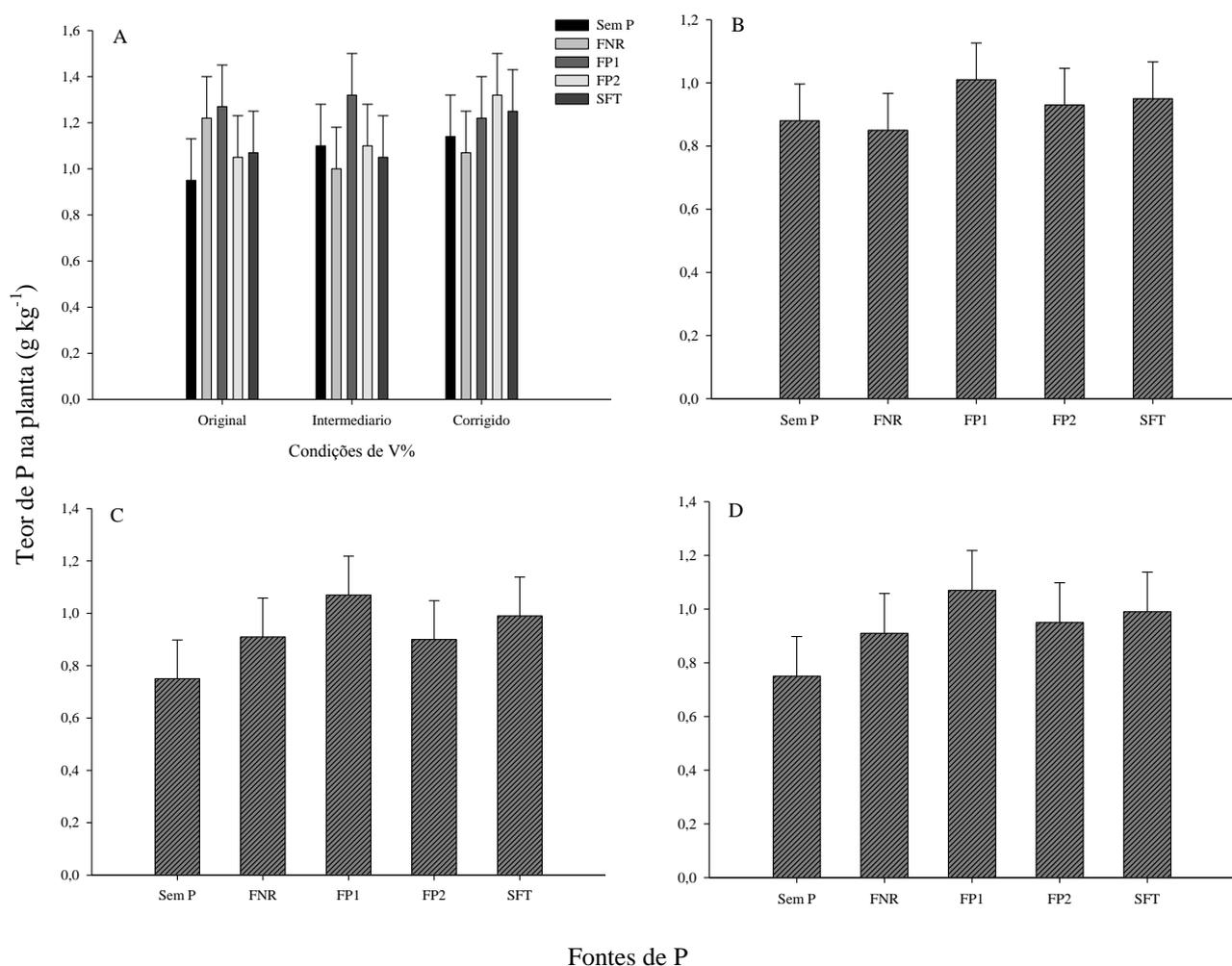


Figura 24. Teor de fósforo na planta em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte.

Ouvides et al. (2010) afirmam que quando se adiciona uma fonte solúvel de P em solos intemperizados, mais de 90% do total aplicado são adsorvidos na

primeira hora de contato com o solo e Novais et al. (1980) também relatam que o maior tempo de contato solo-fosfato favorece sua maior solubilidade ocasionando menor disponibilidade de P para as plantas. Como a capacidade de solubilização das fontes alternativas é menor que a de um fosfato solúvel, sugere-se que para uma cultura como é o caso das pastagens, torna-se vantajosa sua utilização, já que a proporção de fósforo adsorvido ao solo será menor e conseqüentemente o fósforo solubilizado ao longo do tempo pode estar mais disponível à gramínea.

Nota-se que o fosfato natural reativo proporcionou os maiores teores de fósforo na planta em condições de acidez não corrigida maior até que a fonte solúvel SFT, no primeiro corte avaliativo, demonstrando novamente que a solubilidade desta fonte é maior em condições de acidez. Em condições de pH próximo a neutralidade a solubilidade desta fonte diminui, como foi o caso do tratamento onde houve aplicação de calcário para elevação do V% a 60. Isso contribuiu para a menor solubilização dessa fontes de P, fato observado por Goedert & Lobato (1984), Hammond et al. (1986) e Sanzonowicz & Goedert (1986). Esses autores afirmam terem os fosfatos naturais sua eficiência melhorada quando aplicados a lanço e incorporados a solos ácidos, argilosos, com baixos níveis de Ca trocável e P solúvel, em culturas de ciclo longo ou perenes, tolerantes à acidez e eficientes na utilização do fósforo. Neste caso, os resultados corroboram com os estudos acima, já que a gramínea obteve os maiores teores de fósforo advindo desta fonte em condições de pH ácido.

Observa-se também que o teor de fósforo na planta diminuiu ao longo do tempo de cultivo, do 1º ao 4º corte, independente da fonte utilizada. Isto pode ser explicado por um lado, pela extração excessiva do P no solo com os cortes, e de outro, pela tendência de maior produção de massa de matéria seca no mesmo sentido, promovendo o chamado efeito diluição. Estes resultados corroboram com Leite et al., 1986, que ao avaliar os efeitos de fontes de P em capim-colonião, também detectaram diminuição nos teores de P do 1º para o 2º ano, atribuindo este fato ao aumento da produção de massa de matéria seca, com conseqüente diluição do elemento dentro da planta.

Para o acúmulo de fósforo na planta, ou seja, o fósforo absorvido em função da produção de matéria seca observa-se que houve interação entre os fatores estudados apenas no primeiro e no segundo corte avaliativo. No terceiro e no quarto corte não houve interação entre os fatores, entretanto, observa-se que, analisando-os

isoladamente, nota-se diferença entre os diferentes níveis de acidez do solo e das fontes de fósforo na terceira época de avaliação. No último e quarto corte, houve diferença apenas entre as fontes de fósforo (Figura 25).

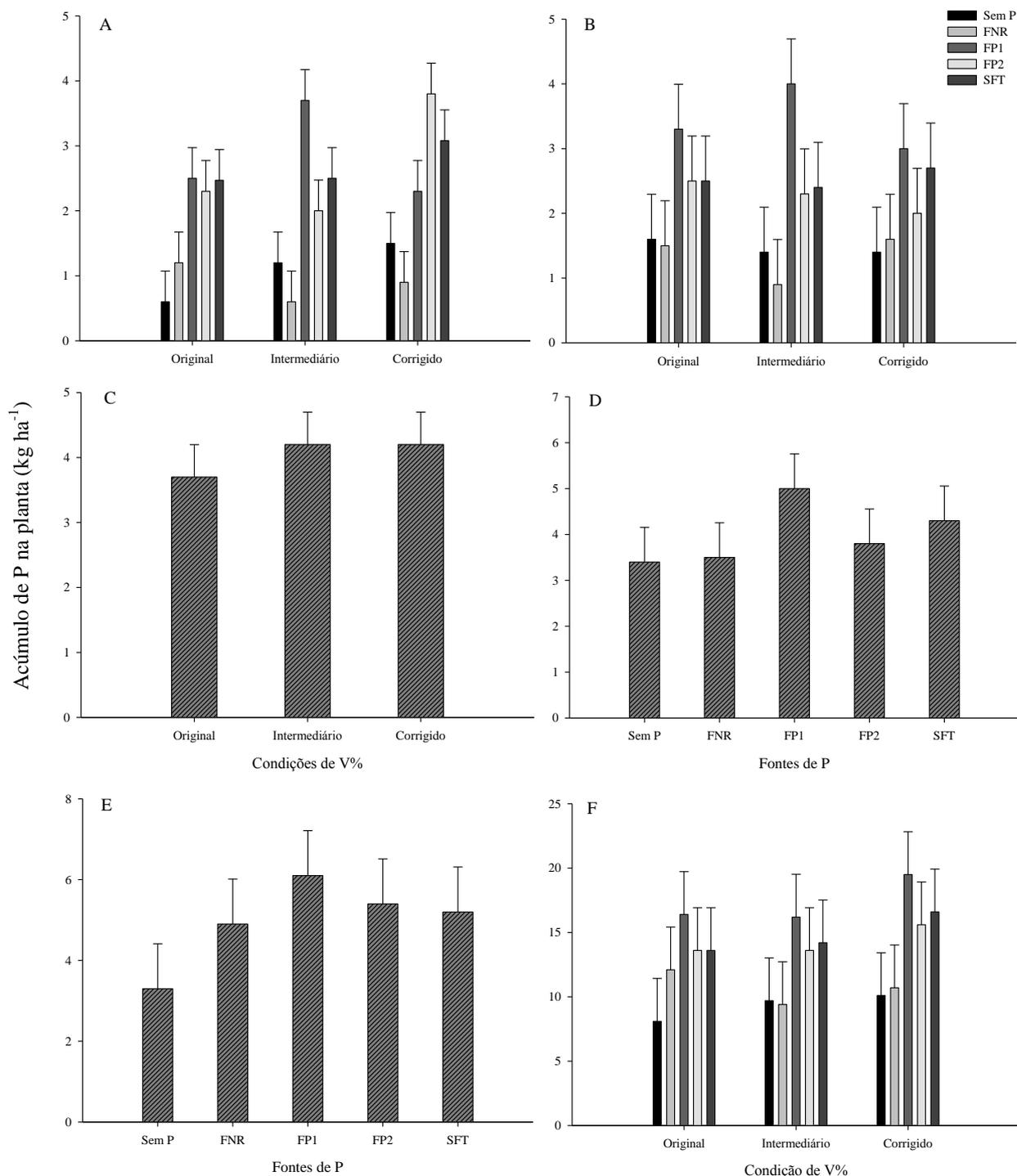


Figura 25. Acúmulo de fósforo na planta em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1<sup>o</sup> corte; (B) 2<sup>o</sup> corte, (C e D) 3<sup>o</sup> corte, (E) 4<sup>o</sup> corte, (F) Total.

Nota-se que no 1<sup>o</sup> corte, a fonte alternativa FP1 foi superior que a fonte de referência SFT quando o V% encontrava-se a 45%, obtendo-se acúmulo de P de

373,70 mg, acúmulo este maior que o de 253,37 obtido com o uso do SFT, no respectivo nível de V%. O FP2, também obteve altos acúmulos de fósforo assemelhando-se ao SFT, destacando-se com acúmulo superior que FP1 apenas no V% de 60. Nota-se que o FNR obteve os maiores acúmulos apenas onde não houve correção do pH, ou seja, no nível de V% original.

Apenas no 4º corte o FNR, foi semelhante à fonte de referência, apresentando acúmulo de 4,9 kg de P ha<sup>-1</sup> e o SFT de 5,2 kg de P ha<sup>-1</sup>. Ao observar o comportamento desta fonte, nota-se que em determinadas situações, como por exemplo no 1º e 2º corte, onde houve correção do pH e elevação do V%, o FNR, obteve valores acumulados de P, menores até que o tratamento sem utilização de P, indicando que o uso de fontes menos solúveis não é recomendado nessa fase vegetativa (FREIRE et al., 2005). Resultados similares foram verificados por Costa et al. (2008), quando os autores observaram menores acúmulos de fósforo no tecido de capim marandu, para fosfatos de baixa solubilidade, na presença de calcário. Nessa fase, as fontes solúveis de P, como o SFT e as fontes alternativas testadas, com destaque para o FP1, são mais indicadas, pois conseguem suprir a demanda pelo nutriente nesse curto período após o plantio do capim braquiária (MACIEL et al., 2003).

Nota-se que a fonte FP1 proporcionou o maior acúmulo de fósforo proporcionalmente ao acúmulo de matéria seca do capim marandú em condições de solo com V% intermediário em todos os cortes avaliativos. A fonte FP2 obteve comportamento muito semelhante à fonte de referência SFT, demonstrando que em condições de acidez corrigida, o acúmulo de fósforo por esta fonte é maior. Entretanto quando se observa o acúmulo total, ou seja, a soma de todos os cortes avaliativos em função da massa de matéria seca total produzida pelo capim marandú, nota-se que o acúmulo total proporcionado pela fontes alternativas utilizadas no experimento, foi para o FP2 estatisticamente igual ao SFT em todos os níveis de V% e que o FP1 foi até mesmo superior que a fonte de referência. Esses dados revelam que em casos específicos de pastagem, com uso de *Urochloa brizantha*, cultivar marandu, o uso de fontes como o FP1, consideradas até então como rejeitos, podem substituir com eficiência, a adubação fosfatada com fontes convencionais. O uso de fontes que proporcionam altas concentrações de fósforo na matéria seca da forrageira justifica-se também, pelo fato de que o P é o elemento mineral que mais onera o custo dos suplementos minerais para bovinos. Dentro disso, quanto maior o teor deste elemento na matéria seca das forrageiras,

menor será o consumo pelos bovinos via suplementação mineral. Sendo assim, é de suma importância a maior capacidade de assimilação e concentração de P na parte aérea pela planta forrageira.

### **16.8 Acúmulo de Ca**

Para o acúmulo de Ca na planta, observa-se interação entre as fontes de fósforo e as diferentes condições de acidez do solo apenas para o primeiro e quarto corte, além da soma do acúmulo total do elemento na planta. No segundo e terceiro corte avaliativo não foi observada interação entre os fatores, contudo, analisando-os isoladamente nota-se que no segundo corte as fontes de fósforo proporcionaram diferenças no acúmulo de Ca no capim-marandú, enquanto que no terceiro corte avaliativo, tanto as fontes, quanto a aplicação de doses de calcário influenciaram a quantidade de cálcio acumulada na planta (Figura 26).

O fato de haver diferença na absorção de cálcio pela planta pode ser justificado já que houve tratamentos com e sem aplicação de calcário, além de que, todas as fontes utilizadas no estudo possuem cálcio em sua composição, sendo fosfato natural reativo com maior concentração do elemento em questão. Contudo, observa-se que nos tratamentos com FNR, o acúmulo de Ca na planta foi menor que nas demais fontes, alcançando maiores valores ( $25,4 \text{ kg ha}^{-1}$ ) apenas no último e quarto corte, em condições de solo ácido, o que já era esperado, afinal sabe-se que esta fonte tem sua solubilidade aumentada ao longo do tempo e em condições ácidas.

Em média, ao observar todos os cortes realizados e em relação ao acúmulo total de Ca na planta, observa-se que a fonte FP1 foi a que proporcionou maior acúmulo em condições de acidez intermediária, sendo superior a todas as outras fontes estudadas, demonstrando ser essa fonte, além de potencial fertilizante fosfatado, ser também considerada adequada fonte de cálcio para a pastagem.

De maneira geral, observou-se que o aumento dos níveis de fósforo foi acompanhado pelo aumento nos teores de Ca na planta. Este comportamento pode ser atribuído ao teor de cálcio existente na composição das fontes que foi fornecido juntamente com os níveis de P, elevando a disponibilidade de Ca às plantas. Para Ernani e Barber (1991) e Coutinho et al. (1991) os fertilizantes fosfatados diferem, principalmente quanto à composição química, solubilidade e cátion acompanhante, o que foi observado neste estudo, sendo que as fontes utilizadas, FP1, FP2, FNR e SFT apresentavam em sua

composição de 24,8, 15,0, 32,6 e 13,1 % de  $\text{Ca}^{2+}$ , respectivamente. Essas diferenças podem influir na taxa de solubilização dos fosfatos e nas reações de precipitação e adsorção química de P nas regiões adjacentes aos grânulos ou partículas de fosfatos, onde a intensidade é alta, com reflexos na concentração de P na solução do solo. Esses reflexos na concentração de P foram observados neste estudo pelo aumento no teor de fósforo no solo proporcionado pelas fontes, como já discutido.

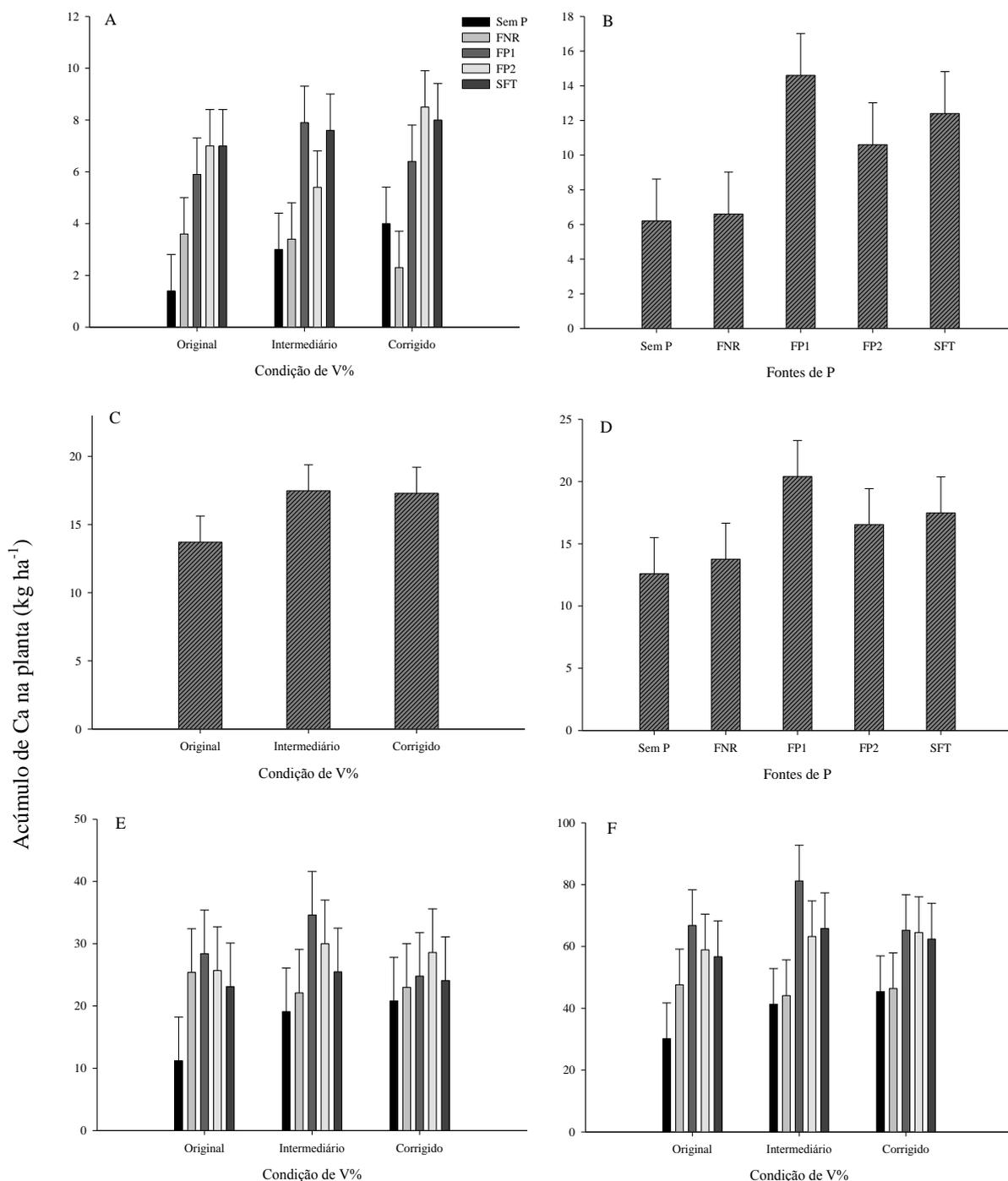


Figura 26. Acúmulo de Ca na planta em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1<sup>o</sup> corte; (B) 2<sup>o</sup> corte, (C e D) 3<sup>o</sup> corte, (E) 4<sup>o</sup> corte, (F) Total.

### 16.9 Massa de matéria seca

As fontes de P e sua interação com os níveis de V% influenciaram a produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) da *Urochloa brizantha*, com exceção apenas para o segundo corte onde não houve interação entre os fatores. Contudo analisando-os isoladamente nota-se diferença para as fontes e para as condições de V% (Figura 27). Observa-se que houve comportamento semelhante quando se compara com o acúmulo de P, mostrando novamente que para esta variável, as fontes alternativas utilizadas proporcionaram produções de MSPA semelhantes e até superiores que à fonte de referência SFT.

Observa-se que no primeiro corte avaliativo, a fonte FP1 e FP2 proporcionaram as maiores produções de MSPA, semelhantemente à fonte de referência SFT. Entretanto nota-se que a maior produção proporcionada pela fonte FP1 (2820 kg ha<sup>-1</sup>) na primeira época de colheita foi maior em condição de acidez intermediária, sendo superior até mesmo que o SFT (2417 kg ha<sup>-1</sup>). Contudo em condições de acidez corrigida, a produção da fonte FP1 foi menor (1897 kg ha<sup>-1</sup>), enquanto que da fonte FP2 aumentou, passando de 1860 kg ha<sup>-1</sup> no V% intermediário para 2839 kg ha<sup>-1</sup> em condições de acidez corrigida (V% 60), alcançando neste caso níveis semelhantes à do SFT 2476 kg ha<sup>-1</sup>.

No primeiro corte não foi observado incremento na produção de massa de matéria seca proporcionada pela fonte FNR. Nota-se produção um pouco maior (978 kg ha<sup>-1</sup>) que o tratamento controle (623 kg ha<sup>-1</sup>) em condições de solo ácido, produção esta, inferior que das demais fontes testadas. Contudo, no último corte avaliativo, 240 dias após a emergência, nota-se que o fosfato natural reativo proporcionou produção de massa de matéria seca (5877 kg ha<sup>-1</sup>) semelhante às demais fontes, inclusive à fonte de referência SFT (5425 kg ha<sup>-1</sup>) em condições de solo com pH ácido.

Estes resultados corroboram os resultados de Soares & Macedo (1988), Oliveira et al. (1984) e Vasconcelos et al. (1986), que afirmam ser superior a resposta inicial na implantação de pastagens, para as fontes solúveis mas, com o decorrer do tempo, fontes menos solúveis tendem a aumentar a produção pelo aumento de sua reatividade e por apresentarem maior efeito residual. Por isso, considera-se pertinente a estratégia de aplicar no plantio conjuntamente o fosfato natural com uma fonte solúvel de fósforo. Dessa forma, observou se que os crescimentos, assim como as produções de massa de matéria seca, quanto foi utilizado o FNR foram limitados pela falta de fósforo no estabelecimento da planta, ou seja, de acordo com FREIRE et al. (2005), a utilização das

fontes menos solúveis não é recomendada nessa fase vegetativa. Para isso, recomenda-se, para o estabelecimento de pastagens fontes solúveis de fósforo, aplicações localizadas, de modo que favoreçam a alta disponibilidade de fósforo junto às raízes, para que atenda aos maiores requerimentos do nutriente na fase de crescimento da planta.

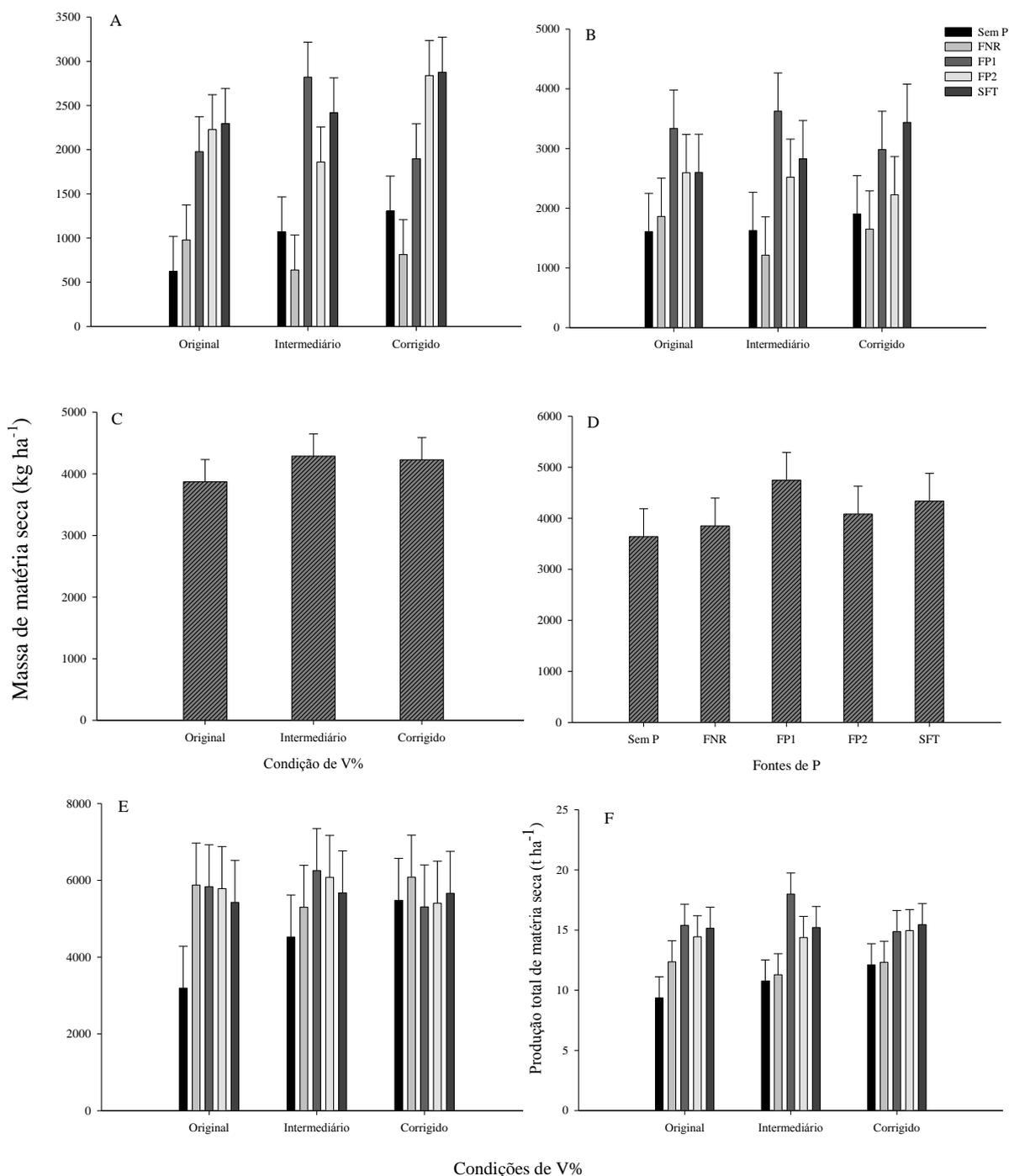


Figura 27. Produção de massa de matéria seca em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo, determinada após a colheita das plantas, (A) 1<sup>o</sup> corte; (B) 2<sup>o</sup> corte, (C e D) 3<sup>o</sup> corte, (E) 4<sup>o</sup> corte e (F) total.

No segundo corte avaliativo, observa-se que a fonte FP1 proporcionou em condições de solo ácido e com acidez intermediária as maiores

produções de massa de matéria seca do capim marandú, 3337 e 3624 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente, quando comparada às demais fontes, obtendo produção menor (2983 kg ha<sup>-1</sup>), porém semelhante ao SFT (3437 kg ha<sup>-1</sup>) apenas onde a acidez foi corrigida. É importante salientar que para esta época de avaliação e em condições de acidez intermediária a fonte FP1 alcançou níveis de produção de MSPA maior que a própria produção proporcionada pela fonte de referência.

Na terceira época de avaliação, 180 dias após a emergência, ao analisar os fatores isoladamente nota-se que em condições de acidez intermediária, a produção de MSPA foi maior que o tratamento controle, contudo semelhante à produção em condições de acidez corrigida. A correção do solo aumentou os teores médios de matéria seca no terceiro corte, porém não houve diferença estatística entre a produção obtida no V% intermediário quando comparada à produção obtida no V% corrigido. Esses resultados concordam com os encontrados por Cruz et al., 1994, que ao estudarem o efeito da calagem sobre a produção de massa de matéria seca do capim marandú, observaram que à medida que houve aumento do índice de saturação por bases, a produção de matéria seca também aumentou. Entretanto, Soares Filho (1991), em experimento com braquiária submetida à incorporação de calcário não encontrou efeito significativo sobre a produção de matéria seca. Nunes et al., (1979), concluíram ao estudar em um Latossolo que pequenas aplicações de calcário são suficientes para que as braquiárias atinjam rendimentos máximos de produção de biomassa. Na literatura, respostas de gramíneas forrageiras à calagem têm sido contraditórias, variando em uma mesma espécie e entre espécies. Vale salientar importância do Ca como nutriente e também a tolerância das braquiárias à toxidez de Al, não sendo necessário, contudo altas doses de calcário para alcance de altos índices de produção de massa de matéria seca.

No último corte avaliativo, observa-se interação entre os fatores fontes e condições de V%, entretanto nota-se que neste estágio todas as fontes se comportaram de maneira semelhante à fonte solúvel de referência, não havendo diferença significativa entre elas. Contudo, ao analisar o acúmulo de produção de massa de matéria seca total, ou seja, a soma de todos os cortes é possível observar que em média a maior produção foi obtida com o uso da fonte FP1 (18 t ha<sup>-1</sup>) em condições de acidez intermediária (V% 45), maior que a fonte de referência, SFT, que proporcionou produção de 15,4 t ha<sup>-1</sup>. A fonte FP2 obteve a maior produção em condições de acidez corrigida

(V% 60), atingindo 15 t ha<sup>-1</sup> e o FNR obteve sua maior produção onde não houve correção da acidez do solo (V% 11), atingindo 12,4 t ha<sup>-1</sup>).

Esses resultados discordam de Costa et al. (2008) que ao avaliarem a resposta do capim Marandu a diferentes fontes de P em um Latossolo Vermelho distroférico, observaram efeito positivo da adubação fosfatada na produção total de forragem porém não encontraram diferença significativa entre as fontes, superfosfato triplo (ST), fosfato reativo de Arad (FRA) e a mistura ST + FRA, exceção para o fosfato de Araxá (FA) em que a produção foi inferior às demais. Contudo, em geral, a aplicação do fósforo pelas três fontes avaliadas promoveu incremento da produção média de massa matéria seca, em relação à testemunha. Destacando-se, assim, a importância da adubação fosfatada para o estabelecimento de pastagens de *U. brizantha* cv. Marandu, nas condições edafoclimáticas representadas pelo experimento.

#### **16.10 Índice de eficiência agronômica (IEA)**

Os índices de eficiência agronômica variaram entre as fontes para os quatro cortes realizados e para o IEA total ao final dos quatro cortes (Figura 28).

Observa-se que quando o FNR foi aplicado na presença de calcário, houve um decréscimo no IEA. Nota-se que no primeiro corte o FNR obteve índices negativos quando comparado à fonte de referência SFT. Seus índices foram inferiores às demais fontes de fósforo nos quatro cortes e no total, independentemente da presença ou da ausência de calcário. Contudo, ao longo dos cortes o IEA para esta fonte foi crescente. Nota-se que no 4º corte, onde não houve correção do solo, o IEA desta fonte superou o SFT, atingindo o índice de 120%. Esse comportamento de evolução ao longo dos cortes foi observado por Bonfim-Silva et al. (2012) que avaliaram a massa do capim marandu sob aplicação de fosfato reativo.

Ao avaliar fontes de fósforo de baixa solubilidade (fosfato reativo de Arad e fosfato natural de Araxá) em capim-marandu, Costa et al. (2008) observaram aumento do IEA ao longo do tempo. Segundo estes autores, o aumento do IEA destas fontes é justificado pelo efeito residual dos fosfatos naturais reativos e menor adsorção de fósforo, no decorrer de quatro cortes, uma vez que a liberação de fósforo para a solução do solo é mais lenta (CAIONE et al., 2011).

Sabe-se que a acidez é um fator muito importante para a solubilização dos fosfatos naturais. Nesse âmbito, espera-se que espécies acidificantes da rizosfera

favoreçam a dissolução e a eficiência agrônômica desses fosfatos. Em espécies do gênero *Urochloa*, e no presente experimento verificou-se diminuição do pH do solo ao longo dos ciclos e maior produção de MSPA utilizando FNR apenas no 4º corte e na ausência de calcário. Tais resultados apontam para perspectivas de uso dos fosfatos naturais apenas para a fase de manutenção das pastagens, quando os requerimentos externos da planta são efetivamente menores, em razão da maior eficiência na aquisição do fósforo.

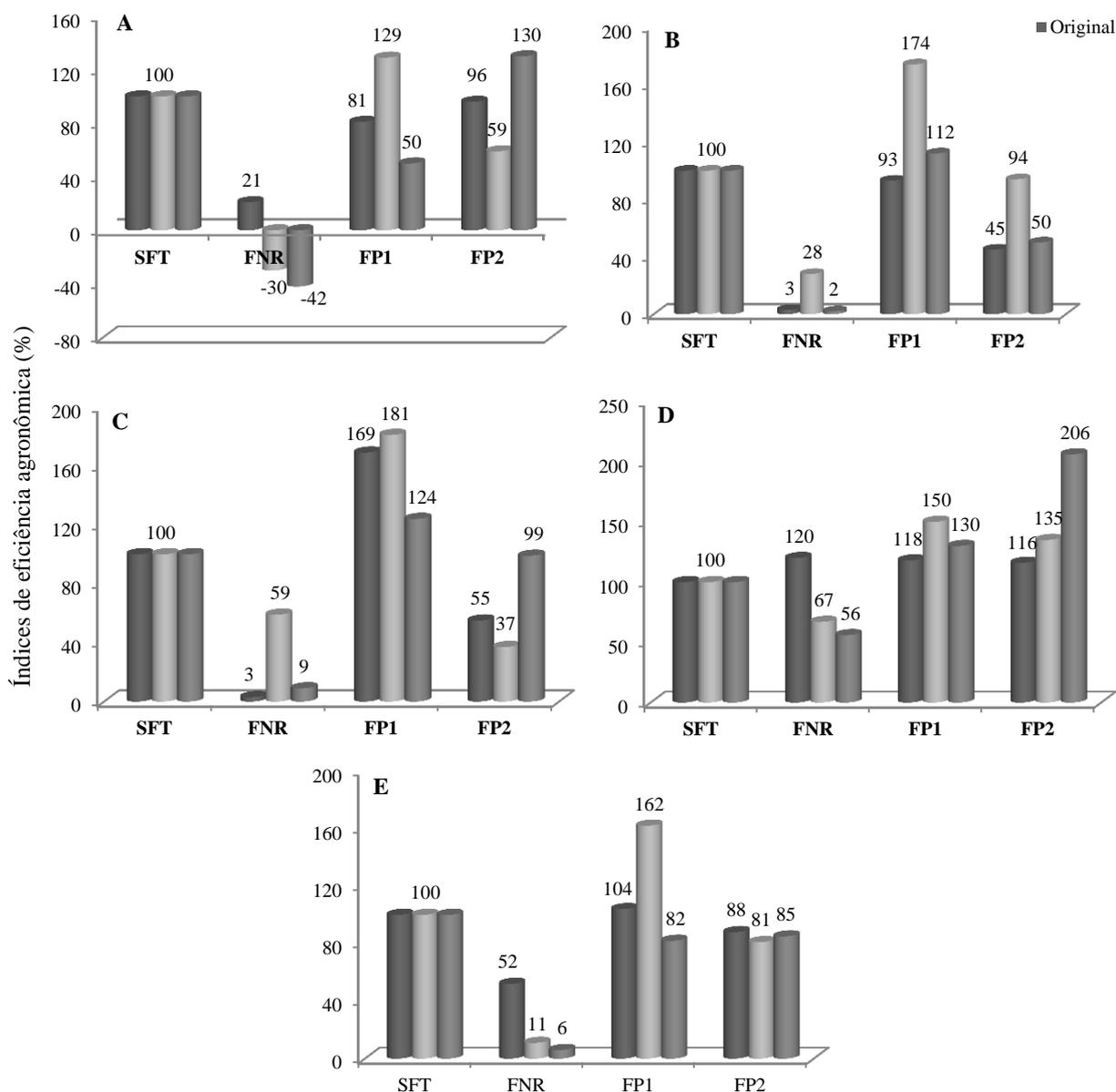


Figura 28. Índices de eficiência agrônômica de fosfatos (%) em função de diferentes condições de V% e fontes de fósforo de P nos quatro cortes realizados e total, (A) 1º corte; (B) 2º corte, (C) 3º corte, (D) 4º corte, (E) Total.

Em relação às fontes alternativas de fósforo, observa-se que o FP1, proporcionou em todos os cortes e no total, índices superiores à fonte de referência. Nota-

se que os maiores índices, foram obtidos quando o V% foi elevado a 45. É possível observar que em todos os cortes, no V% intermediário, o FP1 atingiu o maior IEA, quando comparado às demais fontes.

O FP1 proporcionou as maiores produções de massa de matéria seca, o maior número de perfilhos e de folhas e também foi a fonte que no geral proporcionou os maiores acúmulos de fósforo pelo capim marandu, indicando que seu uso em pastagens com essa gramínea é rentável e positivo. Tanto aos 60 dias após a emergência da forrageira (1º corte) quanto aos 240 DAE (4º corte), o FP1 foi superior ao SFT em condições de acidez intermediária, mostrando que tanto no estágio inicial quanto ao longo do tempo esta fonte disponibilizou fósforo à gramínea. Tais fatos discordam dos resultados de Soares & Macedo (1988), Oliveira et al. (1984) e Vasconcellos et al. (1986), que afirmam ser superior a resposta inicial na implantação de pastagens, para as fontes solúveis.

O FP2 também atingiu altos IEA em todos os cortes analisados e no total, principalmente em condições de acidez corrigida, onde possivelmente a disponibilidade de fósforo para planta por esta fonte foi maior. Entretanto, ao observar os índices, nota-se que no geral o FP2, apesar de também mostrar alta eficiência para esta gramínea, seus IEA foram menores quando comparado à outra fonte alternativa FP1, mostrando que sua utilização seria viável apenas na ausência da outra.

Apesar da baixa solubilidade em água, as fontes alternativas proporcionaram altos índices de eficiência agronômica, tal fato pode ser explicado possivelmente porque a baixa solubilidade em água de formas de P contidas em fertilizantes pode ser oriunda de impurezas ou à própria natureza das fontes, porém não é possível afirmar que o desempenho agronômico seja prejudicado em função disto (SIKORA; GIORDANO, 1995; PROCHNOW et al., 2003). Pode-se supor que possivelmente o método atual utilizado para analisar as quantidades de  $P_2O_5$  de um determinado fertilizante não seja eficiente para analisar especificamente esta fonte, estando seus valores subestimados. Observa-se neste caso a possível necessidade de estudos para testar tal hipótese. Chien & Menon (1995), afirmam que a eficiência agronômica da adubação fosfatada é fortemente afetada pela natureza físico-química do fertilizante, por propriedades do solo (acidez, textura, mineralogia, matéria orgânica, etc.), práticas de manejo e espécies vegetais cultivadas. Para Novais & Smyth (1999), a solubilização de adubos fosfatados depende principalmente das propriedades do solo

(acidez e adsorção) e da planta cultivada. Contudo é possível afirmar que tais fontes, em especial o FP1, pode ser utilizado com alta eficiência em pastagens cultivadas com *Urochloa brizantha*, cultivar marandu em condições de solos corrigidos para um índice de saturação de bases aproximado de 45%.

## 17. CONCLUSÕES

As fontes alternativas proporcionaram altos índices de eficiência agronômica e alta produção de massa de matéria seca do capim marandu.

O FNR proporcionou a maior produção de matéria seca e o maior índice de eficiência agronômica apenas no tratamento onde não houve aplicação de calcário no quarto e último corte avaliativo.

O FP2 apresentou melhores rendimentos em condições de acidez corrigida.

O FP1 obteve melhores rendimentos de produção de massa de matéria seca, número de folhas e perfilhos, acúmulo de P e maior IEA em condições de acidez intermediária sendo em geral superior a todas as outras fontes analisadas.

## 18. REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. B. Inf. SBCS, 25:27-32, 2000.
- BARROW, G.M. **Physical chemistry**. McGraw-Hill, New York. 694p., 1961.
- BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable charge soils. **Adv. Agron.**, 38:183-230, 1985.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F. A. Respostas morfológicas e produtivas do capim-marandu adubado com doses combinadas de nitrogênio e enxofre. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 4, p. 1281-1288, 2006.
- BONFIM-SILVA, E. M.; SANTOS, C. C.; FARIAS, L. N.; VILARINHO, M. K. C.; GUIMARÃES, S. L.; SILVA, T. J. A. Características morfológicas e produtivas do capim-marandu adubado com fosfato natural reativo em solo de cerrado. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 6, n. 2, p. 166-171, 2012.
- BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, T. J. A.; CABRAL, E. A.; KROTH, B. E.; REZENDE, D.; Desenvolvimento Inicial de Gramíneas Submetidas ao Estresse Hídrico. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.24, n.2, p180-186, abr.-jun., 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Análises de Corretivos, Fertilizantes e Inoculantes – Métodos Oficiais**. Brasília, Laboratório Nacional de Referência Vegetal (LANARV) / Secretaria de Defesa Agropecuária. 104 p., 1983.
- BRITO NETO, J. F. **Adsorção e disponibilidade de fósforo para o crescimento inicial de mamoneira em solos com diferentes classes texturais**. 2011. 82 f. Tese (Doutorado em

Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

BÜLL, L.T.; LACERDA, S.; NAKAGAWA, J. Termofosfatos: alterações em propriedades químicas em um latossolo vermelho-escuro e eficiência agronômica. **Bragantia**, Campinas, v. 56, p. 169-179, 1997.

CAIONE, G. et al. Fontes de fósforo em variedades de cana-de-açúcar forrageira. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 66-73, 2011.

CAMACHO, M.A. , SILVEIRA, L.P.O. , SILVEIRA, M.V. Eficiência de genótipos de *Brachiaria brizantha* Stapf. (Syn: *Urochloa brizantha*) na produção de biomassa sob aplicação de fósforo. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v.67, n.4, p.1133-1140, 2015.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, v.41, p.227-234, 1995.

COSTA, S. E. V. G. A.; FURTINI NETO, A. E.; RESENDE, Á. V.; SILVA T. O.; SILVA T. R., Crescimento e nutrição da Braquiária em função de fontes de fósforo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1419- 1427, 2008.

COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S. & SITTA, D.S.X. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesq. Agropec. Bras.**, 26:1393-1399, 1991.

CRUZ, M. C. P. et al. Efeito da calagem sobre a produção de matéria seca de três gramíneas forrageiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, DF, v. 29, n. 8, p. 1303- 1312, 1994.

ERNANI, P.R.; BARBER, S.A. Corn growth and changes of soil and root parameters as affected by phosphate fertilizers and liming. **Pesq. Agropec. Bras.**, 26:1309-1314, 1991.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 183p., 2005.

FONSECA, D.M., SALGADO, L.T., QUEIROZ, D.S., CÓSER, A.C., MARTINS, C.E., BONJOUR, S.C.M. Produção de leite e em pastagem de capim-elefante sob diferentes períodos de ocupação dos piquetes. **R. Bras. Zootec.**, v.27, n.5, p. 848- 856. 1998.

FRANCHINI, J.C.; MEDA, A.R. & CASSIOLATO, M.E. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Sci. Agric.**, 58:357-360, 2001.

FREIRE, F. M.; FONSECA, D. M.; CANTARUTTI, R. B. **Manejo da fertilidade do solo em pastagens**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 26, n. 226, p. 44-53, 2005.

FURTINI NETO, A. E.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G.A.A. **Fertilidade do solo**. 252 f. Trabalho de conclusão de curso (Especialização em Solos e Meio Ambiente) – Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão, Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2001.

- GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Avaliação agronômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, p.97-102, 1984.
- GUEDES, E. M. S.; FERNANDES, A. R.; LIMA, E. DO V.; GAMA, M. A. P.; SILVA, A. L. P. Fosfato natural de Arad e calagem e o crescimento de *Brachiaria brizanta* em Latossolo Amarelo sob pastagem degradada na Amazônia. **Revista Ciências Agrárias**, v.52, p.117-129, 2009.
- HAMMOND, L.L.; CHIEN, S.H.; MOKWUNYE, A.V. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.40, p.89-140, 1986.
- HOROWITZ N.; MEURER E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho da partícula. **Ciência Rural**, 33:41-47, 2003.
- JANEGITZ, M.C.; INOUE, B.S.; ROSOLEM, C.A. Soil phosphorus pools as affected by brachiaria and white lupin. **Ciência Rural**. 43:1381-1386, 2013.
- JAYACHANDRAN, K.; SCHWAB, A. P.; HETRICK, B. A. D. Mycorrhizal mediation of phosphorus availability: synthetic iron chelate effects on phosphorus solubilization. **Soil Science Society American Journal**. Madison, v. 53, n. 6, p. 1701-1706, 1989.
- LANGER, R. H. M. Tillering in herbage grasses. **Herbage Abstracts**, v. 33, n. 3, p. 141-148, 1974.
- LINDSAY, W. L.; VLEK, P. L. G.; CHIEN, S. H. Phosphate minerals. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.) **Minerals in soil environments**. 2nd ed. Soil Science Society of America, Book Ser. 1. Soil Science Society of America, Madison, 1989, p.1089-1130.
- MACIEL, C. D. G. et al. Influência do manejo da palhada de capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) sobre o desenvolvimento inicial de soja (*Glycine max*) e amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*). **Planta Daninha**, v. 21, n. 3, p. 365-373, 2003.
- McMENIMAN, N.P. Methods of estimating intake of grazing animals. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, SIMPÓSIO SOBRE TÓPICOS ESPECIAIS EM ZOOTECNIA, 34., 1997, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1997. p.131-168.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 411-416, 1993.
- NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M.; MARTINS FILHO, C. A. Efeito do tempo de incubação do fosfato de Araxá em solos sobre o fósforo disponível. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 4, n. 1, p. 153-155, 1980.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 399p., 1999.
- NUNES, S.G.; VIEIRA, J.M.; SOUZA, J.M. de. **Avaliação de cinco gramíneas tropicais em solo de Cerrado, sob condições de pastejo**. Campo Grande: EMBRAPA-CNPQC, 1979. 3p. (EMBRAPA-CNPQC. Comunicado Técnico, 6).

OLIVEIRA, E.L., O. MUZILLI, K. IGUE & M.T.T. TORNERO. Avaliação da eficiência agronômica dos fosfatos naturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 8: 63-67, 1984.

OLIVEIRA, P.P.A.; OLIVEIRA, W.S.; CORSI, M. Efeito residual de fertilizantes fosfatados solúveis na recuperação de pastagem de *Brachiaria brizantha* cv Marandú em Neossolo Quartzarênico. **Rev. Bras. Zootec.**, v.36, p.1715-1728, 2007.

OURIVES, O. E. A.; SOUZA, G. M.; TIRITAN, C. S.; SANTOS, D. H. Fertilizante orgânico como fonte de fósforo no cultivo inicial de *Brachiaria brizantha* cv. Marandú. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.126-132, 2010.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Adv. Agron.**, 30:1-50, 1978.

PARFITT, R.L. ATKINSON, R.J.; SMART, R.S.T.C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 39:837-841, 1975.

PEIXOTO, R. T. G.; TRAINA, S. J.; BIGHAM, J. M. Matéria orgânica e a geração de cargas elétricas em solos do Paraná. In: ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 2., São Carlos, 1997. **Anais...** São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 1997. p.186.

PEREIRA, J.R.; FARIA, C.M.B. Sorção de fósforo em alguns solos do Semi-árido do Nordeste brasileiro. **Pesq. agropec. bras.**, 33(7):1179-1184, 1998.

PROCHNOW, L.I.; CHIEN, S.H.; TAYLOR, R.W.; CARMONA, G.; HENAO J. & DILLARD, E.F. Characterization and agronomic evaluation of single superphosphates varying in iron phosphate impurities. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 293-302, 2003

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

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas Instituto Agrônomo, 2001. 285p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

REDDY, M.R., DUNN, S.J. Differential response of soybean genotypes to soil pH and manganese application. **Plant Soil**, v.101, n.1, p.123-126, 1987.

RUIZ, M.A., NETO, J.C., SANTANA, J.C. Evaluación preliminar de dos espécies de *Brachiaria* en Itabela, Bahia, Brasil. **Past. Trop.**, v.17, n.1, p.31-37, 1995.

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.

- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F. & CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 306p. 2006.
- SANYAL, S.K.; DE DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Adv. Soil Sci.**, 16:1-120, 1991.
- SANZONOWICZ, C.; GOEDERT, WJ. **Uso de fosfatos naturais em pastagens**. Planaltina, DF: Embrapa- CPAC, 1986. 33p. (Embrapa-CPAC. Circular técnica, 21).
- SIKORA, F.J. & GIORDANO, P.M. Future directions for agricultural phosphorus research. **Fertilizer Research**, v.41, p.167-178, 1995.
- 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**, v.39, n.226, p.542-53, 1992.
- SIMÃO NETO, M., DIAS FILHO, M.B., SERRÃO, E.A.S. Avaliação da adaptação de acesso de *Brachiaria* para a Amazônia Oriental do Brasil. **Past. Trop.**, v.17, n.1, p.9-13, 1995.
- SOARES FILHO, C.V. **Variação sazonal de parâmetros bioquímico-fisiológicos em *Brachiaria decumbens* estabelecida em pastagem**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1991. 110p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo, 1991.
- SOARES, W.V. & M.C.M. MACEDO. **Eficiência de fontes de fósforo para forrageiras em solos ácidos**. p.57-64. In W.J. Goedert & F.A. Dias Filho (Eds). Relatório bienal 1986/87 - Convênio Embrapa/Petrofertil. Brasília. 176 .,1988.
- SOUZA FILHO, A.P.S., MEIRELLES, P.R.L., MOCHIUTTI, S. Desempenho agrônomo de gramíneas forrageiras em condições de campo cerrado do Amapá, Brasil. **Past. Trop.**, v.14, n.1, p.17-21, 1992.
- VASCONCELOS, C.A., H.L. DOS SANTOS, G.E. DE FRANÇA, G.V.E. PITTA, & A.F.C. BAHIA FILHO. Eficiência agrônoma de fosfatos naturais para a cultura do sorgo-granífero. I. Fósforo total e solúvel em ácido cítrico e granulometria, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 10:117-121, 1986.
- WERNER, J.C. **Adubação de Pastagens**. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 1986. 49p.
- WHITEHEAD, D.C. **Nutrient elements in grasslands: soil-plant-animal relationships**. Wallingford: CAB International, 369 p., 2000.
- WOODRUFF, J.R.; KAMPRATT, E.J. Phosphorus adsorption as maximum measured by the langmuir isotherm and its relation hip to phosphorus availability. **Soil. Sci. Soc. Am. Proc.**, 29:148- 150, 1965.
- YOST, R.S.; NADERMAN, G.C.; KAMPRATH, E.J.; LOBATO, E. Availability of rock phosphate as measured by an acid tolerant pasture grass and extractable phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p.463-468, 1982.

## **CAPÍTULO IV - FRAÇÕES DE FÓSFORO EM SOLOS OXÍDICOS APÓS A APLICAÇÃO DE TRADICIONAIS E POTENCIAIS FERTILIZANTES FOSFATADOS**

### **RESUMO**

Fertilizantes fosfatados totalmente acidulados são as principais fontes de fósforo (P) na agricultura mundial. Entretanto existem materiais que atualmente são considerados rejeitos da indústria que possuem fósforo em sua composição e conseqüentemente possuem potencial para serem utilizados como fertilizantes. Dentro deste contexto, objetivou-se integrar métodos químicos para avaliar a dinâmica do P e os produtos de reação de potenciais fertilizantes fosfatados em solos típicos do cerrado brasileiro. Neste trabalho, foram avaliadas as frações de P em dois solos de texturas e capacidade máxima de adsorção de P distintas, um Latassolo Vermelho distroférico de textura argilosa e um Neossolo Quartzarênico de textura arenosa, adubados com fosfatos de reatividade distinta. Foram utilizados também, duas condições de pH, onde o solo permaneceu com o pH original, ácido e outra em que o pH foi ajustado para 6,5 ( $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ). O experimento foi conduzido no laboratório, em placas de petri sob temperatura controlada de  $25^\circ\text{C}$  e o solo permaneceu incubado por 5 semanas. Após esse período cada placa de petri foi amostrada na forma de anéis concêntricos, visando observar o caminhamento do fósforo proporcionado em cada fertilizante. Posteriormente em cada seção da placa de petri foi realizado o fracionamento do P do solo de acordo o método descrito por Hedley et al. (1982), para avaliar como cada fertilizante reagia no solo e quais as principais frações de P foram proporcionadas pelo mesmo. Verificou-se que SFT foi o fertilizante que proporcionou maior movimento do fósforo no solo, contudo apenas para a segunda seção, distante a 10 mm da seção central, provavelmente devido à formação de compostos mais lábeis. Nas demais fontes em geral o P permaneceu na região onde o grânulo foi aplicado. A fonte FP1 foi à fonte alternativa que apresentou comportamento muito parecido e até mesmo superior à fonte de referência SFT, mesmo sendo um fertilizante que apresenta menor solubilidade em água. Proporcionou altos teores de P na fração lábil e P total demonstrando um potencial fertilizante a ser utilizado.

Palavras chaves: fracionamento de fósforo, formas de fósforo, adubação fosfatada.

## CHAPTER V – PHOSPHORUS FRACTION IN SOIL OXIDIC AFTER APPLICATION OF TRADITIONAL AND POTENTIAL PHOSPHATE FERTILIZER

### ABSTRACT

Acidulated phosphate fertilizers fully are the main sources of phosphorus (P) in world agriculture. However, there are materials that currently are considered industry wastes which have phosphorus in their composition and therefore have the potential to be used as fertilizers. Within this context, the objective was to integrate chemical methods to assess the dynamics of P and potential fertilizer phosphatic reaction products in typical Brazilian cerrado soils. In this work, the P fractions were evaluated in two textures of soil and maximum adsorption capacity of different P, a Red Latassolo dystrophic clayey and a sandy texture Quartzarenic Neossolo fertilized with different reactivity of phosphates. were also used two pH conditions where the soil pH remained in the original, another acid and in which the pH was adjusted to 6.5 (CaCl<sub>2</sub> 0.01 mol L<sup>-1</sup>). The experiment was conducted in the laboratory, in petri plates under temperature controlled 25 ° C and the soil remained incubated for 5 weeks. After this period each petri dish was sampled in the form of concentric rings, aiming at observing the match traversal provided in each fertilizer. Subsequently in each petri dish section was performed soil P fractionation according to the method described by Hedley et al. (1982), to assess how each reacted fertilizer in the soil and which are the fractions of P were provided by the same. It was found that FTS was fertilizer providing the highest match move on the ground, but only to the second section, distant 10 mm from the center section, probably due to the formation of labile compounds in other sources in general P remained in region where the bead was applied. The FP1 source was the alternative source that showed very similar behavior and even higher than the source of SFT reference, even as a fertilizer that has a lower solubility in water. He gave high levels of P in P total labile fraction and a fertilizer demonstrating the potential to be used.

**Key words:** phosphorus fractionation, phosphorus forms, phosphorus fertilization.

## 19. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente frequentemente disponível em quantidade limitante para a produtividade dos cultivos, devido à alta capacidade de fixação de P nos solos, principalmente em regiões tropicais onde os solos são ricos em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), e com pH baixo (RICHTER; BABBAR, 1991). Apesar de sua grande importância para o crescimento e desenvolvimento das plantas, o P é um dos macronutrientes exigidos em menor quantidade, sendo o mesmo considerado um dos elementos que mais limitam a produtividade da maioria das culturas (GATIBONI, 2003).

O manejo adequado da adubação fosfatada é crucial para o sucesso da atividade agrícola. Isto se torna mais importante pelo eminente fim das rochas fosfatadas de elevada qualidade (ROSEMARIN et al., 2009). Sendo os minerais fosfáticos um recurso natural escasso, finito e sem substituto, seu manejo deve ser realizado da melhor forma possível. Uma forma de se otimizar o uso deste recurso natural é utilizar rochas fosfáticas consideradas, no passado, como marginais para a produção de fertilizantes fosfatados totalmente acidulados. Porém, o emprego destas rochas na produção de fertilizantes fosfatados via acidulação, comumente gera resíduos insolúveis no produto final (MULLINS et al., 1990).

A grande variação na solubilidade dos fosfatos seja ele natural, ou industrializado, a interação do fertilizante com os componentes do solo, a forma de utilização, e as características da planta cultivada, são fatores que reforçam ainda mais a necessidade de estudos voltados para adubação fosfatada. Além de que, a produção de fertilizantes fosfatados gera uma grande quantidade de resíduos que contém quantidades consideráveis de P, porém estes resíduos não são aproveitados, o que gera uma grande preocupação ambiental devido ao volume de rejeitos, e a má utilização dos recursos naturais. Diferenças importantes são observadas nas reações de fertilizantes com o solo, e isto leva a diferenças na disponibilidade e a difusão do P proveniente destas fontes.

A adição de fertilizantes fosfatados no solo, orgânicos ou inorgânicos, incrementa o teor de P na solução do solo, assim como a liberação de P orgânico pelos compostos orgânicos do solo e a mineralização do P orgânico em P inorgânico pela ação de microrganismos. Mas esse aumento do P na solução do solo ocorre por um curto período, pois o P solúvel, que não é absorvido pelas plantas ou imobilizado na biomassa microbiana, passa rapidamente para a fase sólida por um processo de adsorção (OLIVEIRA, 1982; GONÇALVES; MEURER, 2009). Inicialmente o P adsorvido passa a

compor o P lábil, mas com o tempo se transforma em P não lábil, também denominado de P fixado ou ocluso, que possui ligações químicas mais estáveis e geralmente representa a maior parte do P no solo (RAIJ, 1991).

A compreensão destes processos é muito importante, pois influenciam o desempenho agrônômico dos fertilizantes. Os produtos da reação de fertilizantes acidulados criam zonas saturadas ao redor dos grânulos, alterando o pH, a concentração e a atividade de elementos, levando geralmente ao processo de precipitação de formas de P ligadas principalmente a Ca (em solos alcalinos) e Fe e Al (em solos ácidos) (BOLAN; HEDLEY, 1990).

De certa forma é possível prever o desempenho agrônômico de fontes de P caso os processos e as reações entre grânulo e solo sejam muito bem conhecidos (McLAUGHLIN et al., 2011). Embora seja uma ferramenta muito valiosa, faltam trabalhos desta natureza em solos de regiões tropicais, tentando integrar os mecanismos envolvidos na dissolução dos fertilizantes e difusão do P com o desempenho agrônômico. Este fato é particularmente relevante nos dias atuais, visto que atualmente buscam-se fontes alternativas de fósforo e sobre o qual ainda pouco se sabe. Neste contexto, objetivou-se integrar métodos químicos para avaliar a dinâmica do P e os produtos de reação de potenciais fertilizantes fosfatados em solos típicos do cerrado brasileiro, local onde há grandes áreas de pastagem e agricultura tecnificada e extensiva.

## **20. MATERIAL E MÉTODOS**

### **20.1 Caracterização dos solos**

Foram selecionados dois solos oxídicos que apresentaram variações texturais, ácidos, com baixos teores de P, baixos teores de matéria orgânica, coletados em áreas distintas da Fazenda Experimental Lageado, Botucatu / SP na camada de 0-20 cm de profundidade, com baixas concentrações de fósforo sendo classificados como NEOSSOLO QUARTZARÊNICO distrófico – RQ, (textura arenosa), LATOSSOLO VERMELHO distrófico – LVdf, (textura argilosa), cujas características químicas estão apresentados na Tabela 24. A capacidade máxima de adsorção dos solos (isoterma de Langmuir) de 1,055 mg g<sup>-1</sup> ou 1055 mg kg<sup>-1</sup> para o solo LVdf e 243 mg kg<sup>-1</sup> ou 0,243 mg g<sup>-1</sup> para o solo RQ foi obtida após a realização de uma curva de adsorção de P, seguindo os procedimentos descritos por Graetz e Nair (2000) (Figura 29).

Tabela 24. Características químicas e granulometria do solo avaliadas de 0 a 0,20 m de profundidade.

Solos	Atributos químicos									Análise granulométrica				
	pH CaCl <sub>2</sub>	M.O. g dm <sup>-3</sup>	P <sub>resina</sub> mg dm <sup>-3</sup>	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V% (%)	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Areia (g kg <sup>-1</sup> )	Silte	Textura
RQ	4,3	11	0	24	0,7	2	1	4	28	15	135	802	63	Arenosa
LVdf	4,0	22	2	82	0,9	8	3	12	94	13	584	163	253	Argilosa

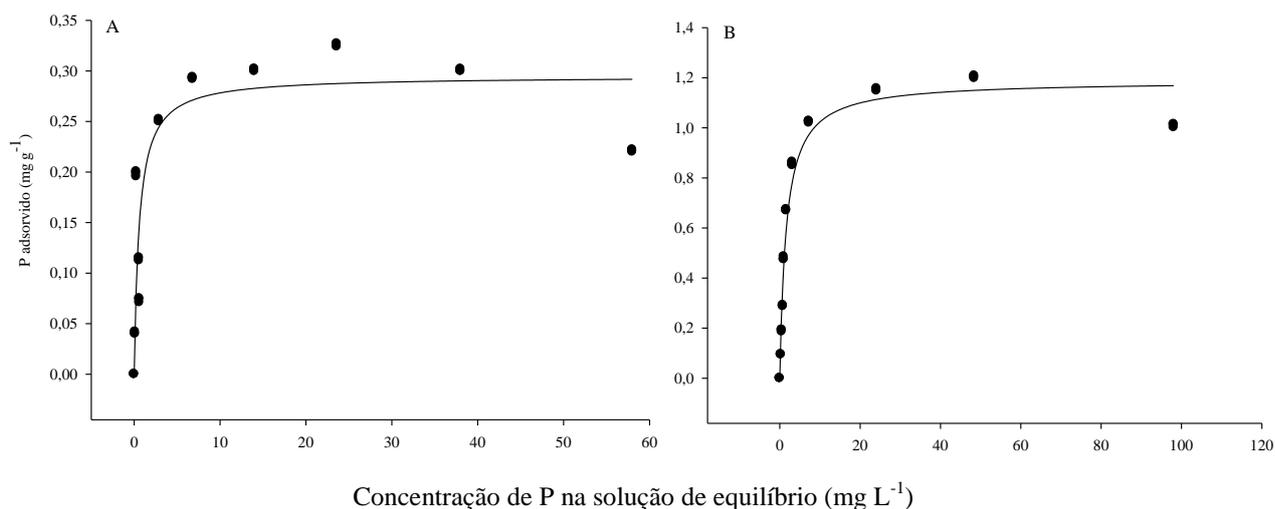


Figura 29. Representação gráfica da capacidade máxima de adsorção do solo, por meio do ajuste da curva de adsorção à equação da isoterma de Langmuir, (A) solo RQ, textura arenosa, (B) solo LVdf, textura argilosa.

Foram utilizados duas condições de pH, onde o solo permaneceu com o pH original, ácido e outra em que o pH foi ajustado para 6,5 (CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>). O pH do solo foi ajustado por meio da aplicação de hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>. Sabe-se que a disponibilidade de P é otimizada nesta faixa de pH, sendo que em meio ácido ocorre a formação de compostos de baixa solubilidade, principalmente dos tipos Fe-P e Al-P e, quando o meio é alcalino predominam os compostos do tipo Ca-P (HAVLIN et al., 2005). Esta variação de pH é justificada pelo fato de que algumas fontes como o fosfato natural reativo apresenta maior solubilidade em solos ácidos, além de ter a capacidade de liberar fósforo de maneira progressiva e contínua.

## 20.2 Definição e caracterização das matérias primas utilizadas

Foram testados fertilizantes fosfatados totalmente acidulados tradicionais e de referência como o superfosfato triplo e outros considerados novos, potenciais e/ou alternativos. São dois materiais residuais, provenientes do processo tradicional de fabricação de fertilizante como o superfosfato simples, cujas características químicas são apresentadas na Tabela 25 e 26. Considera-se a importância destes

fertilizantes em termos de localização e de riqueza em reservas totais e teores, mas que possuem fatores limitantes para o aproveitamento tradicional enriquecido em  $P_2O_5$ , pois quando comparado aos fertilizantes fosfatados acidulados, observa-se nestas fontes menor exigência quanto ao teor total e o teor solúvel em água.

Tabela 25. Características dos materiais fosfatados

Amostras	$P_2O_5$ -T	$P_2O_5$ -AC	$P_2O_5$ -CNA	$P_2O_5$ -Ag	$K_2O$	S-SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- % -----											
FP1	10,20	5,00	5,00	0,00	0,00	3,60	24,76	0,23	0,00	1,05	0,03	0,05
FP2	15,20	10,50	8,00	0,00	0,00	2,50	15,00	0,34	0,01	3,29	0,08	0,08
Fosfato reativo	30,00	12,00	6,00	0,00	0,04	2,36	32,60	0,33	0,02	0,39	0,00	0,06
Super Triplo	48,00	40,00	47,00	39,00	0,00	4,40	13,10	0,26	0,02	1,79	0,07	0,08

T – Total; AC – Ácido Cítrico a 2% Rel-1:100; CNA - Citrato neutro de amônio+água; Ag – água

Tabela 26. Composição granulométrica das fontes de fósforo utilizadas (%).

Fontes <sup>(1)</sup>	Material passante na peneira de 4 mm <sup>(2)</sup>	Material passante na peneira de 1 mm <sup>(3)</sup>
FP1	100	99,26
FP2	88,43	58,17
FNR	100	99
SFT	74,63	6,35

<sup>(1)</sup>FP1: Fosfato Precipitado 1; FP2: Fosfato Precipitado 2; FNR: Fosfato Reativo e SFT: Super Fosfato Triplo. <sup>(2)</sup>ABNT 5; <sup>(3)</sup>ABNT 18.

### 20.3 Incubação em placas de petri

O experimento foi conduzido no laboratório de química do solo da Universidade Estadual de Oklahoma, EUA, onde as placas de petri com o solo e os tratamentos permaneceram em período de incubação, com procedimentos semelhantes aos adotados por Lombi et al. (2004), Lombi et al. (2006) e Hettiarachchi et al., (2008). Os procedimentos consistiram em acondicionar 80 g do solo úmido em cada placa de petri de 86 mm de diâmetro. Posteriormente, a quantidade de água necessária para atingir 60% da capacidade máxima de retenção foi adicionada, gota a gota, com auxílio de uma seringa.

As placas de petri foram etiquetadas, tampadas, vedadas com filme plástico e recobertas com papel alumínio, para evitar variações na umidade e contato com a luz. Permaneceram incubadas por 24 horas com temperatura controlada a 25 °C, para assegurar a distribuição uniforme da água através do solo contido na placa de petri. Após esta pré-incubação, os recipientes foram abertos e os grânulos dos fertilizantes testados foram colocados exatamente no centro das placas de petri e ligeiramente afundados para que os mesmos ficassem equidistantes em relação à base e à tampa da placa de petri.

Em cada placa de petri (exceto no tratamento controle), 8,8 mg de P foram adicionados de acordo com metodologia adotada por Silva, (2013). Finalmente as placas de petri contendo solo e fertilizante foram tampadas, vedadas e recobertas antes de serem submetidas à incubação por cinco semanas. Este período foi escolhido uma vez que a absorção de uma quantidade suficiente de P deve ocorrer neste período para a maioria das culturas de interesse econômico, sendo este um fator crítico para a cultura expressar seu máximo potencial produtivo (WILLIAMS, 1948). Por fim, a adoção de cinco semanas de incubação permite a comparação com o resultado de outras pesquisas que utilizaram o mesmo tempo de incubação (Figura 30).

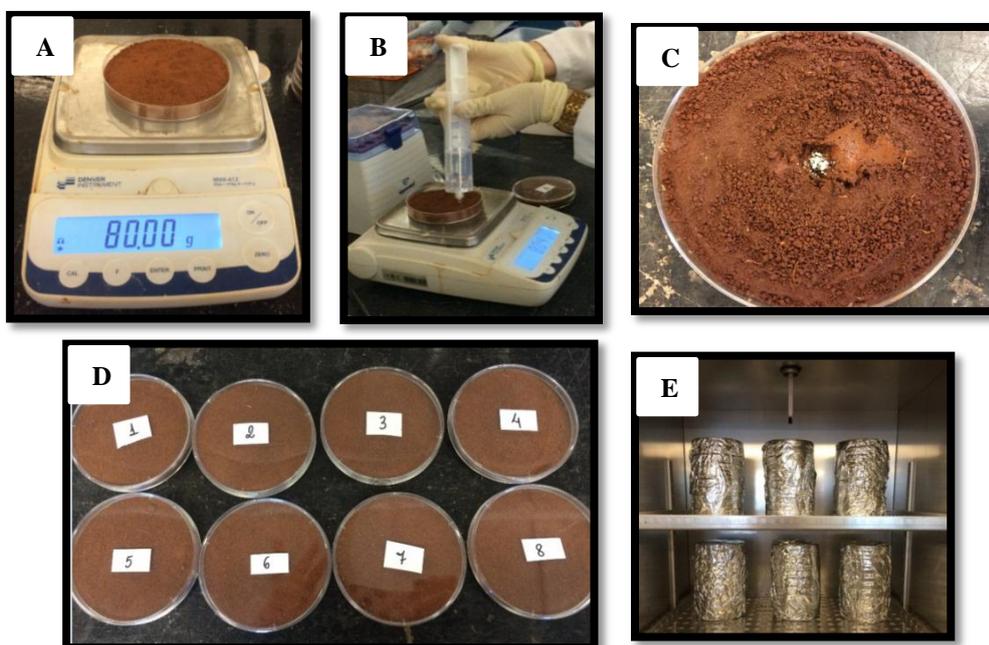


Figura 30. Procedimento utilizado para a incubação em placas de petri (A) Pesagem do solo; (B) adição de água; (C) adição do fertilizante; (D) placa de petri etiquetada; (E) placas recobertas para incubação.

Ao final deste período de incubação, as placas de petri foram abertas para a amostragem do solo na forma de anéis concêntricos. O remanescente do fertilizante foi homogeneizado junto com a secção central removida de 15,5 mm de diâmetro. Posteriormente, foram removidas as secções circulares de diâmetro igual a 27 mm, 51 mm e 86 mm, iniciando pela região central (Figura 31). As amostras foram secas a 40 °C até massa constante, para posterior realização das análises químicas.

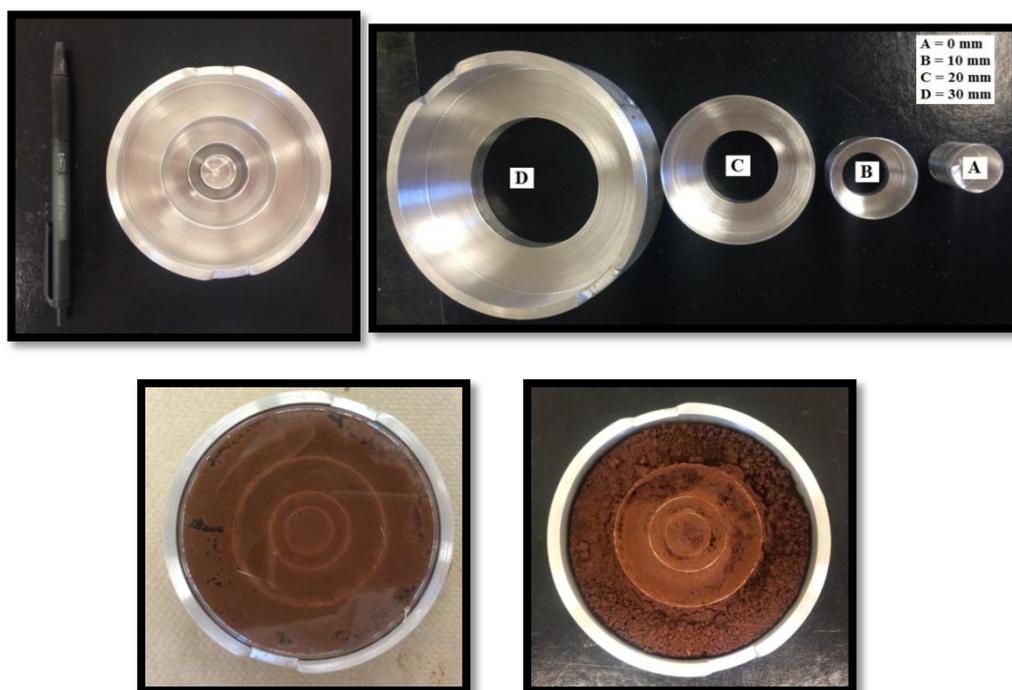


Figura 31. Procedimento de amostragem das secções circulares das placas de petri.

#### 20.4 Fracionamento de P no solo

Foi realizado o fracionamento do P do solo de acordo com as modificações propostas por Condrón e Goh (1989), Gatiboni (2003) e Souza (dados não publicados) sobre o método descrito por Hedley et al. (1982).

O fracionamento é um método de extrações sequenciais numa mesma amostra, cuja ordem são usadas substâncias com capacidade crescente de extração do nutriente estudado. No caso do fósforo, são usados extratores que estimam desde as formas lábeis até as recalcitrantes.

Cross & Schlesinger (1995) agruparam as frações de P extraídas no fracionamento de Hedley em grupos separados por força de ligações, especificamente dois grupos, os quais foram chamados de fósforo geoquímico e fósforo biológico. O fósforo geoquímico é considerado a soma das frações inorgânicas mais o P residual, enquanto que o fósforo biológico é a soma das frações orgânicas. Nos dados do fracionamento apresentado aqui, também foi agrupado os dados de acordo com estas duas frações e com as demais forças de ligação, P lábil, P moderadamente lábil e P não lábil.

Foram acondicionados 0,5 g de solo de cada amostra em triplicata, em tubos falcon e submetidos à seguinte sequência de extração: resina de troca aniônica, RTA; bicarbonato de sódio 0,5 mol L<sup>-1</sup> (NaHCO<sub>3</sub>) com pH corrigido para 8,5; hidróxido

de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  (NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ); ácido clorídrico  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (HCl); hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (NaOH  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ). Após as extrações, o solo foi seco em estufa a  $50^\circ\text{C}$ , moído em cápsula de porcelana onde  $0,1 \text{ g}$  desse solo foi submetido à digestão com solução de  $\text{MgCl}_2$  saturado,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico) concentrado e  $\text{H}_2\text{O}_2$  (peróxido de hidrogênio) concentrado utilizando a técnica descrita por BROOKES e POWLSON, 1982. O procedimento laboratorial para a realização do fracionamento de Hedley foi esquematizado na Figura 32.

Os extratos alcalinos, obtidos com as extrações por  $\text{NaHCO}_3$  e NaOH  $0,1$  e  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , foram separados em duas alíquotas em que, em uma dessas alíquotas foi determinado o fósforo inorgânico (Pi) analisado pelo método de Dick & Tabatabai (1977) e o fósforo total por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico em autoclave (USEPA, 1971), sendo o fósforo orgânico (Po) obtido pela diferença entre fósforo total e fósforo inorgânico. O fósforo dos extratos ácidos foi determinado segundo a metodologia de Murphy & Riley (1962).

Para evitar o resíduo do extrator anterior nas extrações seguintes, o solo foi centrifugado com solução de NaCl  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  após a retirada de cada extrato, de acordo com o descrito por Gatiboni et al. (2013). As determinações dos teores de P foram realizadas com espectrofotômetro e a soma de todas as frações extraídas na análise de fracionamento foi identificada por P TOTAL. As formas de P foram agrupadas em: P lábil (Pi-RTA + Pi-BIC + Po-BIC), moderadamente lábil P (Pi-HID 0.1 + Po-HID 0.1 + Pi-HID 0.5 + Po-HID 0.5), P não-lábil (Pi-HCl + P-RES), geoquímicos (soma de todas as formas Pi), biológicos (soma de todas as formas Po) e o total de compartimentos P (soma de todas as formas Pi e Po).

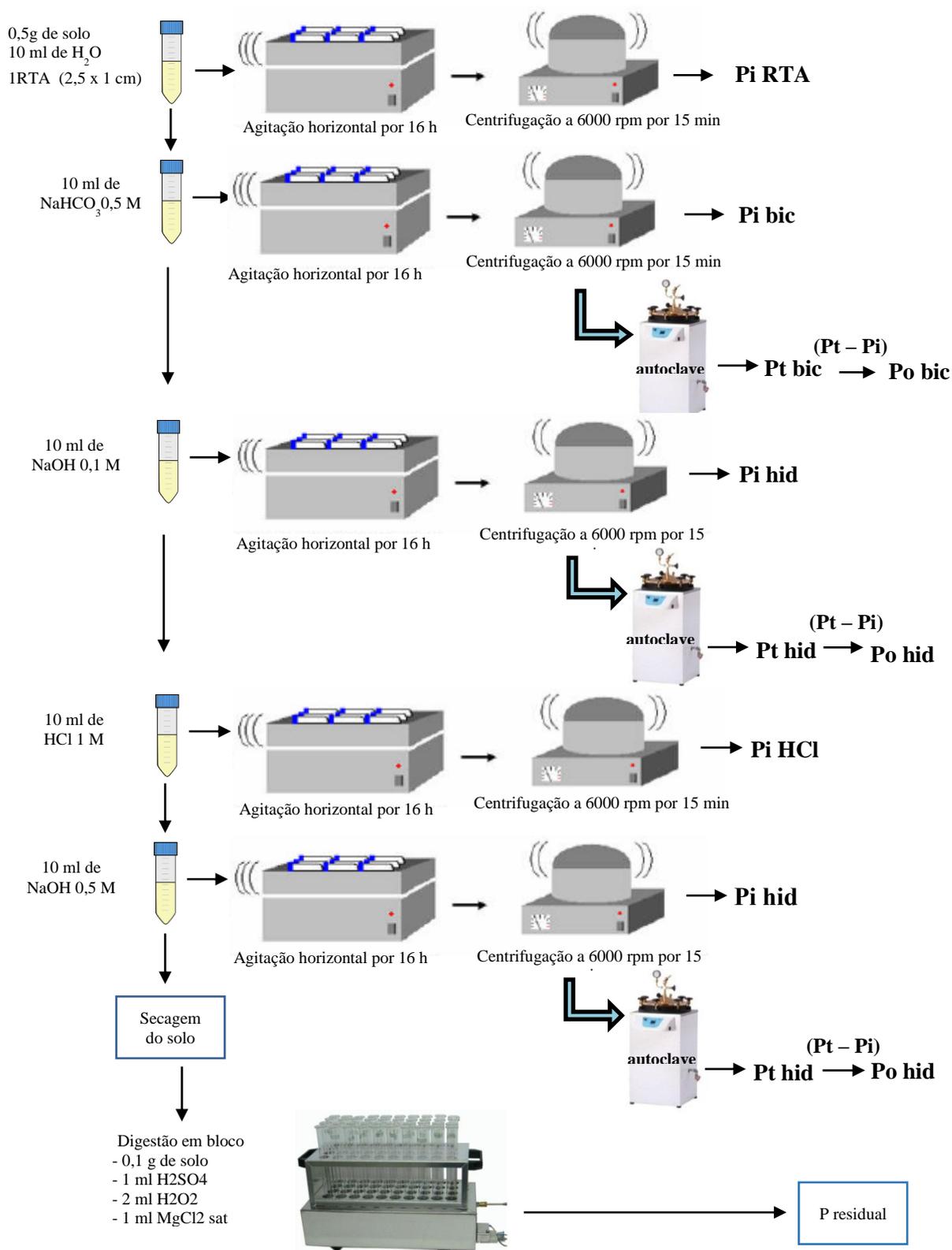


Figura 32. Esquema de extração sequencial e determinações de P em solo, onde as siglas Pi, representam fósforo inorgânico, Po, fósforo orgânico e Pt, fósforo total. Os extratores representados pelas siglas RTA, resina de; BIC, bicarbonato de sódio; HCL, ácido clorídrico e Hid hidróxido de sódio.

## 20.5 Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi em design fatorial inteiramente casualizado, 2 x 2 x 5, onde cada fator constou de dois tipos de solo, um de textura argilosa e outro de textura arenosa, duas condições de pH, ácido e moderadamente ácido e 4 fontes de fósforo, além de um tratamento sem adição de P, com 3 repetições totalizando 60 placas de petri ou 60 unidades experimentais.

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o programa estatístico SISVAR e os gráficos foram plotados no programa SigmaPlot versão 11. Quando o teste F apresentou significância (Anova), foi realizado o teste de Tukey ao nível de 5% de significância para comparação das médias.

## 21. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 21.1 Análise de fracionamento do fósforo

#### 21.2 P - lábil

Os extratores RTA e bicarbonato estimam o fósforo inorgânico disponível (Pi-RTA e Pi-Bic). O extrator  $\text{NaHCO}_3$  também estima o fósforo orgânico (Po-Bic). De acordo com Gatiboni et al. (2007), eles extraem formas de P lábeis que contribuem ativamente no suprimento de P para as plantas.

Diversos autores indicam que os fosfatos extraídos pela RTA e pelo bicarbonato de sódio correspondem à mesma forma de P no solo, o P lábil em equilíbrio com o P da solução do solo (GONÇALVES; MEURER, 2009; BLAKE et al., 2003; REDEL et al., 2007; PAVINATO et al., 2009), e por isso essas frações extraídas no método de fracionamento foram analisadas juntamente.

Observa-se que houve interação dos fatores analisados fontes de fósforo e distância do grânulo de fertilizante para o teor de P – lábil ao nível de 1% de probabilidade. Nota-se que, a maior concentração de fósforo lábil foi obtida na seção central para ambos os solos e nas duas condições de pH, já que é conhecido o baixo caminhamento do elemento no solo (Figura 33).

Observa-se que no solo RQ, em condições de pH ácido a fonte FP1 proporcionou os maiores teores de fósforo lábil na primeira seção da placa de petri ( $496 \text{ mg dm}^{-3}$ ) seguido pela fonte SFT ( $439 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e em condições de pH corrigido  $541 \text{ mg dm}^{-3}$  para fonte FP1 e  $493 \text{ mg dm}^{-3}$  para a fonte SFT. Esta situação leva a sugerir que possivelmente os métodos atuais que avaliam a disponibilidade da quantidade de P solúvel

de um determinado fertilizante fosfatado, estejam subestimando a quantidade de P solúvel em água desta fonte alternativa FP1, já que se verifica alta quantidade de P-lábil disponibilizada pela mesma, teores maiores que a própria fonte de referência SFT, independente da condição do pH.

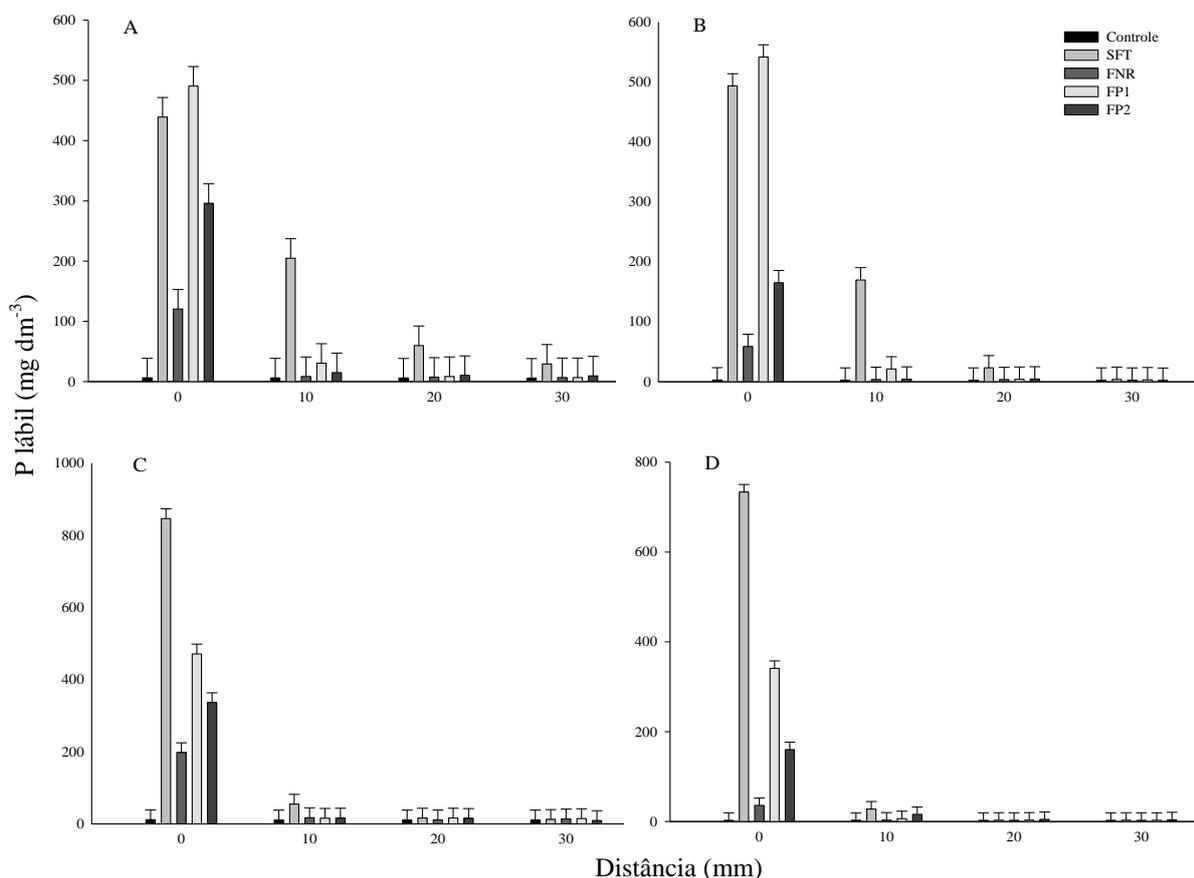


Figura 33 – Teores de fósforo lábil no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C - pH 4,2 D - pH 6,0).

Na segunda seção, para o solo RQ, houve variação no teor de P-lábil apenas para a fonte solúvel SFT, superior às demais. Isto pode ser explicado pelo fato de que o SFT é um fosfato acidulado, com alto teor de fósforo solúvel em água quando comparado às demais fontes e o solo arenoso por possuir naturalmente menor teor de argila, possui conseqüentemente menor capacidade de adsorção de P (243 mg dm<sup>-3</sup>) o que pode ter contribuído para o caminamento do P disponibilizado por esta fonte na segunda seção com distância de 10 mm do fertilizante. Novais & Smyth (1999) afirmam que em solos mais argilosos ocorre uma maior quantidade de sítios ácidos de Lewis, favorecendo assim a adsorção de P que, inicialmente, aumenta os teores de P lábil. No entanto, com o tempo de contato, o P passa para formas de menor labilidade. Entretanto, nota-se que este

fato não ocorreu com a fonte FP1, já que o teor de P na seção central disponibilizada por esta fonte foi superior. Possivelmente isto pode ter ocorrido pela solubilização conjunta do cálcio, já que esta fonte fosfatada possui alta concentração do elemento em sua composição (24,76%), enquanto o SFT possui 13,10%. Ao ser solubilizado, o cálcio pode formar precipitados com o P, tornando o menos disponível, ou menos lábil.

Verifica-se que no solo RQ, a correção da acidez do solo, com consequente elevação do pH, proporcionou aumento do teor do P – lábil. Isso possivelmente ocorreu porque o pH adequado melhorou as condições químicas do solo, contribuindo para o aumento da mineralização da matéria orgânica (MOS) e permitindo consequentemente aumento do P orgânico (P-org) extraído pelo extrator  $\text{NaHCO}_3$ . Devido à grande importância na disponibilidade para as plantas das frações inorgânicas e orgânicas extraídas por bicarbonato, Adepetu & Corey (1979), Sharpley et al. (1987), Tiessen et al. (1993), Guerra et al. (1996) e Maroko et al. (1999) sugerem que essas formas fossem incluídas como parâmetros de disponibilidade de fósforo em sistemas com baixa disponibilidade e baixa adição de fertilizantes, justamente pela contribuição do P-orgânico no sistema solo planta. Diversos trabalhos relatam a maior participação do P orgânico no P total do solo (Condrón et al., 2005), principalmente devido à sistemas de manejo que visam a manutenção e aumento do teor de matéria orgânica no solo, que contribuem significativamente na disponibilidade de P e determinação da produtividade das culturas (SIMPSON, 2012). Com a adição de fertilizantes fosfatados, há o acúmulo de fósforo em formas inorgânicas e orgânicas com diferentes graus de energia de ligação, embora o acúmulo das formas inorgânicas seja mais pronunciado.

Em relação ao segundo solo estudado (LVDf), nota-se diferenças quanto a disponibilidade de fósforo pelas fontes quando compara-se ao solo RQ. Neste solo, cuja textura é argilosa, observa-se em condições de pH ácido maior disponibilidade do P-lábil advinda da fonte de referência SFT ( $846 \text{ mg dm}^{-3}$ ) quando comparada as demais, seguida pela fonte FP1 ( $471 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Em condições de pH corrigido a fonte de referência também proporcionou os maiores teores de P no solo ( $733 \text{ mg dm}^{-3}$ ), seguida também pela fonte alternativa FP1 que proporcionou ( $341 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Os maiores teores de P-lábil neste solo pode ser explicado porque o mesmo apresenta maior teor de matéria orgânica suficiente para a mineralização e consequente aumento do P-org. O P orgânico pode se constituir em uma importante fonte desse nutriente às plantas através de sua mineralização. Essa mineralização é mediada pelas fosfatases, enzimas que catalisam a

hidrólise de ésteres de fosfatos, liberando fosfato solúvel. Essas enzimas são produzidas pelas plantas e microrganismos do solo, e suas atividades podem ser influenciadas pelos diferentes atributos dos solos (NAHAS et al., 1994).

O fosfato natural reativo, embora tenha proporcionado teores de P-lábil bem menor que as demais fontes, apresentou os maiores índices de P onde não houve correção da acidez em ambos os solos. Ao contrário dos fosfatos solúveis em água, a eficiência dos fosfatos naturais nacionais tem sido menor quando se faz a correção da acidez do solo através da calagem (Goedert & Lobato, 1980 e Cantaruti et al. 1981). Isto pode ser explicado, uma vez que os fosfatos naturais contém a fluorapatita que se decompõem em meio ácido para formar fosfato monocálcico e outros compostos solúveis. O tempo de reação do fosfato com o solo também pode influenciar a disponibilidade de cada fonte especificamente já que o FNR tem sua solubilidade aumentada com o passar do tempo.

Verifica-se que a fonte FP2 não atingiu teores semelhantes aos das fontes FP1 e SFT em nenhum dos tratamentos. Entretanto nota-se que para esta fonte os maiores teores de fósforo foram obtidos em condições de solo ácido, atingindo 295 mg dm<sup>-3</sup> no solo RQ e 336 no solo LVdf. Já em condições de acidez corrigida os teores proporcionados por esta fonte foram menores atingindo 165 mg dm<sup>-3</sup> no solo RQ e 160 mg dm<sup>-3</sup> no solo LVdf. Possivelmente esta fonte apresentou maior solubilidade em solo ácido devido à presença de cálcio em sua composição, já que este fertilizante apresenta o maior teor de cálcio quando comparado as demais fontes testadas.

### 21.3 P moderadamente lábil

O terceiro extrator do fracionamento de Hedley é o NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. Este extrai formas inorgânicas e orgânicas de fósforo que não foram acessadas pela RTA e bicarbonato. O fósforo inorgânico é extraído pelos ânions OH<sup>-</sup> da solução extratora que dissolvem uma porção do nutriente ligado ao ferro e alumínio nos colóides, hidrolizando-os (FIXEN; GROVE, 1990). A extração do fósforo orgânico pelo NaOH também ocorre por ação dos ânions OH<sup>-</sup>, que provocam a hidrólise parcial dos compostos orgânicos (Dalal, 1977). Como as formas inorgânicas lábeis já foram retiradas pelos extratores anteriores, o fósforo extraído por NaOH é de labilidade intermediária e provavelmente seja aquele que está associado aos colóides inorgânicos, principalmente os óxidos e caulinita, em ligações do tipo monodentado e bidentado. Já o fósforo orgânico extraído por NaOH

pode ser das formas monoéster, diéster, fosfonatos e polifosfatos (Tate & Newman, 1982). A fração que corresponde ao P moderadamente lábil é representada pela soma do P obtido pelos extratores hidróxido de sódio a  $0.1 \text{ mol L}^{-1}$  e a  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  para o fósforo orgânico e inorgânico.

Os teores de P moderadamente lábil foram influenciados pelas condições de pH e fontes de fósforo ao nível de 1% de probabilidade. Observa-se que nos dois solos estudados a maior concentração do elemento encontra-se na primeira seção, onde foi depositado o fertilizante, entretanto no solo arenoso, nota-se diferença nas demais seções para as concentrações de P moderadamente lábil, conforme a fonte utilizada. No solo argiloso, a variação ocorreu apenas na primeira e na segunda seção, possivelmente pela maior capacidade de adsorção que este solo possui (Figura 34).

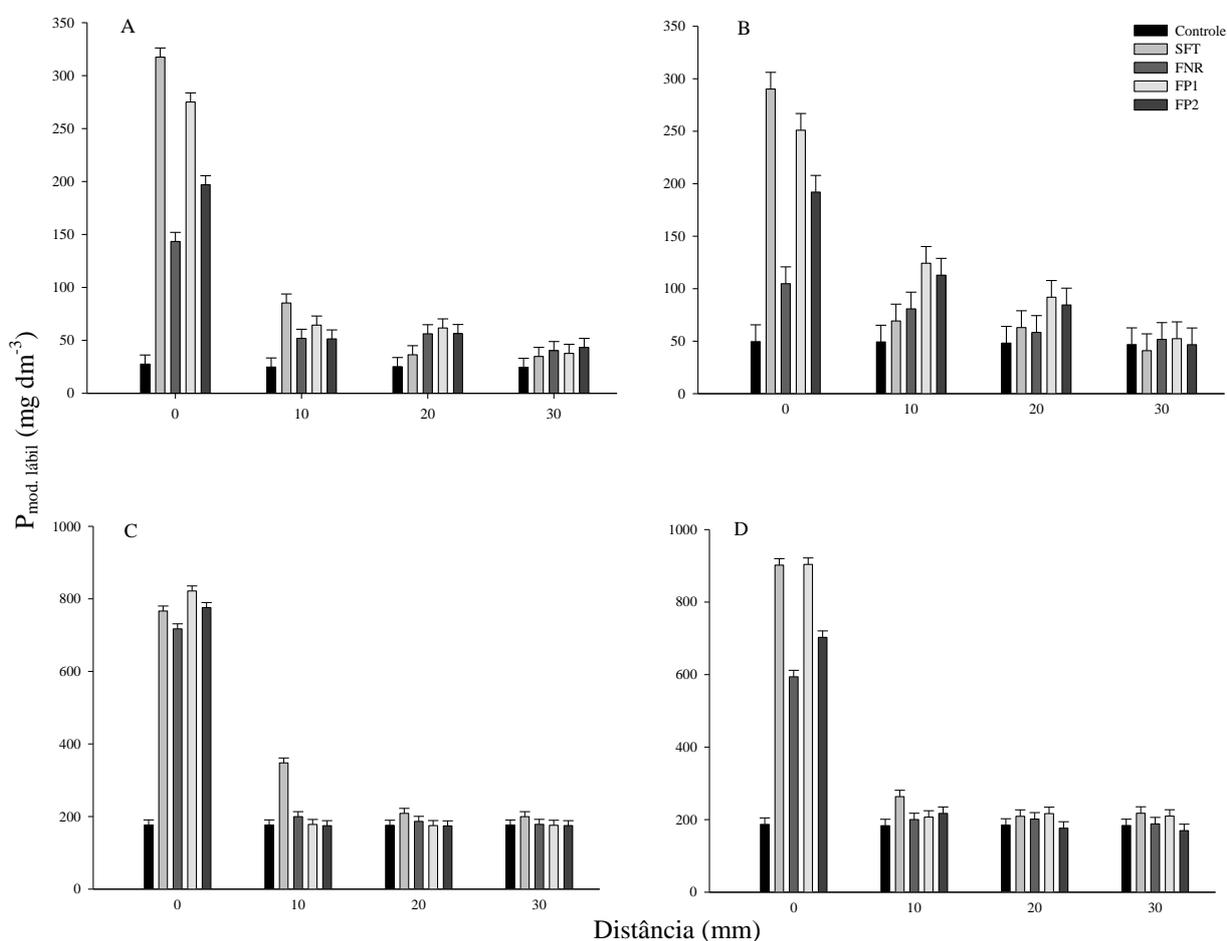


Figura 34. Teores de fósforo moderadamente lábil no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C - pH 4,2 D - pH 6,0).

Verifica-se no solo arenoso diferença entre as fontes, contudo comportamento semelhante quando se compara as duas condições de pH. No tratamento onde foi utilizado o SFT nota-se os maiores teores de P na primeira seção, sendo 317 mg

$\text{dm}^{-3}$  no pH ácido e  $290 \text{ mg dm}^{-3}$  no pH corrigido, seguido pela fonte alternativa FP1 que proporcionou os teores de  $275 \text{ mg dm}^{-3}$  no pH ácido e  $251 \text{ mg dm}^{-3}$  em pH corrigido. A fonte FP2 proporcionou os teores de  $197 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $192 \text{ mg dm}^{-3}$  em pH ácido e corrigido respectivamente. Entre todas as fontes, neste solo o tratamento que recebeu aplicação de FNR foi o que apresentou os menores teores de P moderadamente lábil na primeira seção, sendo  $143 \text{ mg dm}^{-3}$  em pH ácido e  $104 \text{ mg dm}^{-3}$  em pH corrigido.

Nota-se que em condições de pH ácido a variação entre as seções foi pequena, entretanto observa-se diferença entre as fontes na segunda seção, sendo o SFT a fonte que proporcionou os maiores teores de P moderadamente lábil. Já em condições de pH corrigido esta diferença foi maior entre as fontes proporcionando consequentemente maiores teores de P, demonstrando que em condições de pH corrigido, na segunda e na terceira seção, as fontes alternativas superaram a fonte de referência SFT. Possivelmente isso ocorreu por que o SFT é uma fonte solúvel em água e consequentemente, espera-se que em solo arenoso as concentrações proporcionadas por esta fonte sejam maiores na forma de P-lábil, já que a adsorção de P neste solo é menor. Essa característica pode estar associada também à adição de hidróxido de cálcio com o objetivo de elevar o pH, isso pode ter proporcionado a diminuição da interação do fósforo com os colóides do solo pela competição dos sítios com os íons  $\text{OH}^-$ , facilitando sua extração. Também, o aumento na atividade microbiana do solo proporcionado pela calagem (Selbach, 1989) e diminuição da interação do fósforo orgânico com os colóides inorgânicos pode ter aumentado sua mineralização, como observado por Beck & Sanches (1994). Esta característica, das fontes alternativas proporcionarem maiores teores de P moderadamente lábil, podem sugerir que as mesmas possuem maior poder residual, já que, podem com o tempo fornecer P para solução quando comparada ao SFT, o que do ponto de vista de cultivos de culturas de ciclo perene torna-se benéfico.

No solo LVdf, na primeira seção, onde foi depositado o fertilizante e em condições de pH ácido, observa-se que todas as fontes diferiram do tratamento controle. Nesta seção a fonte FP2 demonstrou comportamento semelhante à fonte de referência SFT, proporcionando teores de  $776 \text{ mg dm}^{-3}$  e o SFT de  $766 \text{ mg dm}^{-3}$ . O FNR foi a fonte que atingiu os menores teores quando comparada as demais, entretanto nota-se altos níveis de P moderadamente lábil proporcionado por esta fonte quando comparada ao tratamento controle,  $717 \text{ mg dm}^{-3}$ , valores próximos aos da fonte de referência. Resultados semelhantes foram observados por Olibone e Rosolem (2010), que apesar de terem

adotado um diferente método de fracionamento de P, também notaram que fração de P ligado ao Fe foi maior com a aplicação de SFT do que fosfato natural. Importante salientar que o pH ácido confere maior solubilidade a esta fonte, já que é conhecido a maior eficiência agrônômica de fosfatos naturais em condições de pH ácido. Já a fonte FP1 foi a que proporcionou os maiores teores, diferindo de todas as outras fontes,  $822 \text{ mg dm}^{-3}$ . Nota-se também que não houve grande variação dos teores de P moderadamente lábil nas demais seções, sendo observada diferenças apenas na segunda seção, onde a fonte solúvel SFT proporcionou os maiores teores de P. Observa-se que para este solo em condições de pH corrigido, na primeira seção, assim como aconteceu em condições de pH ácido, houve variação nos teores de P proporcionados pelas fontes. Entretanto, nesta situação a fonte FP2 atingiu níveis menores que em condição de pH ácido,  $702 \text{ mg dm}^{-3}$ . Nota-se também que nesta condição a fonte FP1 proporcionou valores semelhantes à fonte SFT,  $904 \text{ mg dm}^{-3}$  e  $902 \text{ mg dm}^{-3}$ , respectivamente. Os teores dessa fração de P foram bastante altos, e apesar de que o P extraído por NaOH 0,1M representar o P ligado ao Fe e Al, e algumas vezes ser interpretada como um dreno para o P, a energia dessa ligação do P com Fe e Al ainda não é tão forte, e por isso o P dessa fração é considerado moderadamente lábil. Portanto, manter o teor dessa fração em um nível elevado é importante para manter o suprimento de P para as plantas (GUO; YOST, 1998; OLIBONE; ROSOLEM, 2010).

O comportamento das frações inorgânicas e orgânicas extraídas por RTA,  $\text{NaHCO}_3$  e NaOH  $0,1 \text{ mol l}^{-1}$  mostra que estas são sensíveis ao manejo do solo e que suas modificações ocorrem concomitantemente, onde tanto as lábeis quanto as de labilidade intermediária são tamponantes da solução do solo. Por outro lado, quando ocorre depleção em uma forma, outras podem ser desorvidas para tamponá-la, mas o fósforo proveniente destas pode ser readsorvido e/ou imobilizado pela biomassa microbiana. Assim, os colóides do solo e os microrganismos agem como competidores das plantas pelo fósforo da solução (Gatiboni, 2003). A fração de P extraída com NaOH 0,1M deve ser considerada responsável por suprir o P da solução do solo a medida que este seja absorvido pelas plantas (GAHOONIA et al., 2000; PAVINATO et al., 2008).

#### **21.4 P não lábil**

Para o P não lábil foram avaliados o teores de P determinados após o uso dos extratores HCl e da digestão sulfúrica em bloco digestor, o P residual. Observa-se que houve interação entre os fatores, demonstrando que as fontes de fósforo e as seções

influenciaram o teor de P não lábil em ambos os solos e nas duas condições de pH (Figura 35).

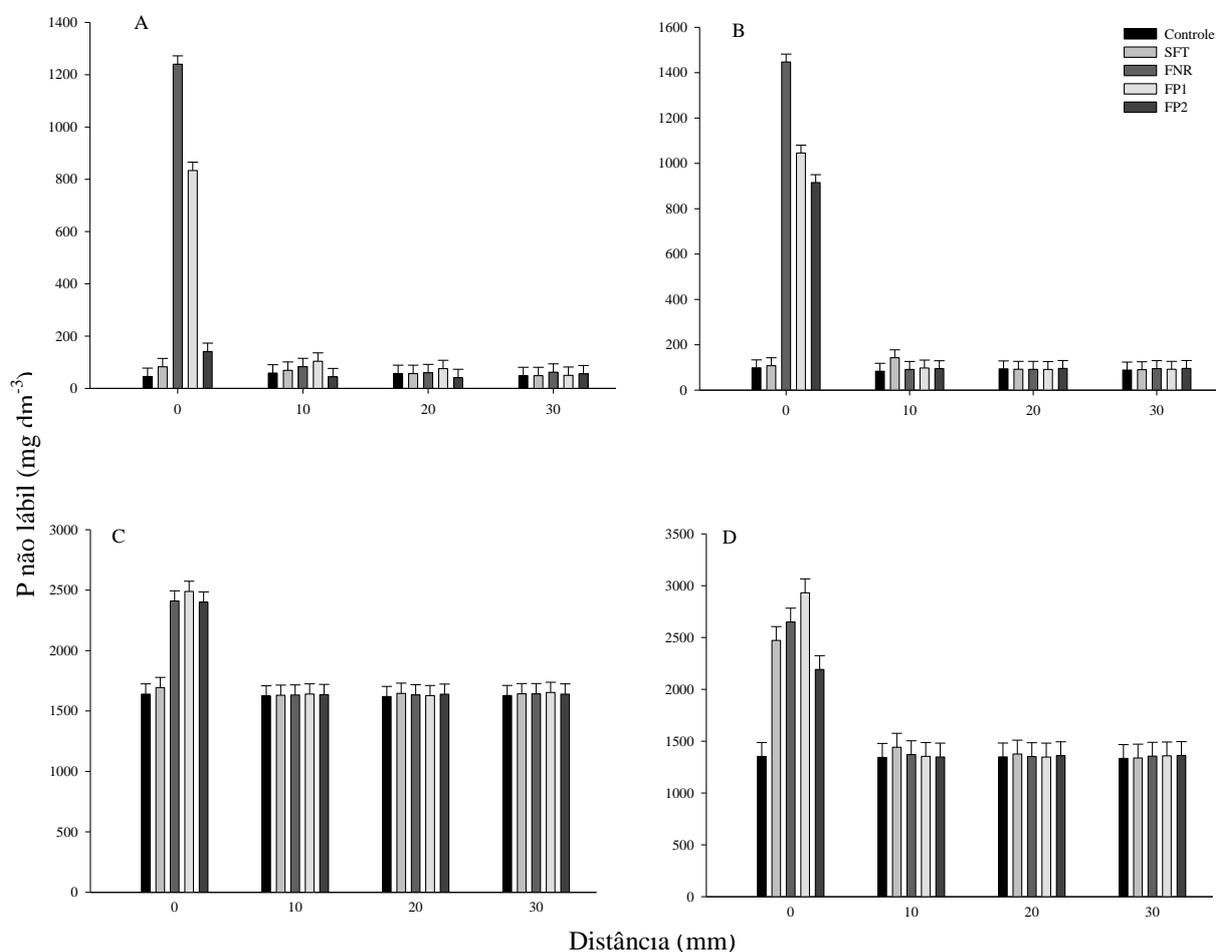


Figura 35. Teores de fósforo não lábil no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C - pH 4,2 D - pH 6,0).

Nota-se que no solo arenoso e na primeira seção, onde foi depositado o fertilizante, a fonte FNR disponibilizou grandes quantidades de P não lábil, atingindo teores de 1240 mg dm<sup>-3</sup> em pH ácido e 1447 mg dm<sup>-3</sup> em pH corrigido. No solo argiloso a maior quantidade de P não lábil proporcionada por esta fonte ocorreu onde houve adição de hidróxido de cálcio para elevação do pH (2650 mg dm<sup>-3</sup>) o que favoreceu a formação de fosfatos de cálcio de baixa solubilidade, devido ao alto teor de P e Ca, semelhante ao observado por Tiecher et al. (2012). Já em condições de solo ácido, houve liberação de maiores quantidades de P lábil e moderadamente lábil por esta fonte, já que o pH ácido possibilita maior solubilidade da mesma. Esta característica de maiores teores de P não lábil proporcionados pelo fosfato natural pode ser justificado também pelo fato de que ao extrator HCl 1 mol l<sup>-1</sup> é atribuída a capacidade de desorção de formas inorgânicas de fósforo associadas ao cálcio (Cross & Schlesinger, 1995). A associação com este cátion

pode ocorrer nos minerais primários, fosfatos de cálcio neoformados e também em fertilizantes fosfatados sem solubilização prévia como os fosfatos naturais.

Verifica-se que nos dois solos estudados e nas duas condições de pH, as fontes alternativas proporcionaram maiores teores de P não lábil quando comparada com a fonte solúvel de referência SFT. Possivelmente isso pode ter ocorrido devido a maior solubilidade do SFT, o que proporciona neste caso maiores teores de P lábil quando comparada com as demais fontes.

Nota-se que nas demais seções não houve grande influência da adição dos fertilizantes, obtendo todas as fontes, comportamentos semelhantes ao tratamento controle, o que indica neste caso que o P não lábil extraído é o P nativo do solo, já presente antes da aplicação dos tratamentos, indicando que o fósforo adicionado é acumulado preferencialmente nas frações de maior labilidade, resultado também observado por Gatiboni (2003).

Ao se comparar os dois solos estudados, nota-se que o solo LVdf possui quantidades muito maiores de P não lábil que o solo RQ, o que é justificável pela diferença no teor de argila de cada solo. O solo LVdf, possui teor e capacidade máxima de adsorção de fosfato muito maior que o solo RQ., resultado que concorda com Pavinato, 2007. Neste caso, formas de P, oclusas ou intrínsecas ao mineral, além da própria fração orgânica húmus, que possui em sua composição, concentrações de P não acessíveis pela planta são extraídas principalmente pela digestão com ácido sulfúrico e  $H_2SO_4$ , denominada de P residual.

Das frações de P estudadas, a maior foi o P residual, composta pela fração húmus mais estável (Stewart et al., 1980) e formas inorgânicas muito insolúveis, consideradas muito resistentes à decomposição (Daroub et al., 2000). É constituída do fósforo remanescente que não foi extraído pelos extratores seletivos do fracionamento de Hedley. Nesta fração estão incluídas formas inorgânicas e orgânicas de alta recalitrância que geralmente não participam ativamente na disponibilidade de fósforo às plantas (Stewart & Sharpley, 1987), embora alguns autores mostrem que em sistemas com alta carência essa fração pode ser fonte de fósforo às plantas (Guo & Yost, 1998; Guo et al., 2000).

### **21.5 P biológico**

O fósforo biológico constitui toda forma orgânica de fósforo extraída pelo fracionamento de Hedley. É importante estimar o quanto esta forma de P, foi

influenciada com a aplicação dos tratamentos já que O fósforo orgânico pode constituir de 20 a 80% do fósforo total do solo e é extremamente relevante nos solos tropicais, pois atua ativamente na disponibilidade de fósforo às plantas. Esta forma de fósforo é originária de resíduos vegetais e animais presentes no solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição.

Houve interação entre os fatores fontes de fósforo, distância do fertilizante e condição de pH, demonstrando que os tratamentos influenciaram os teores de P orgânico no solo (Figura 36).

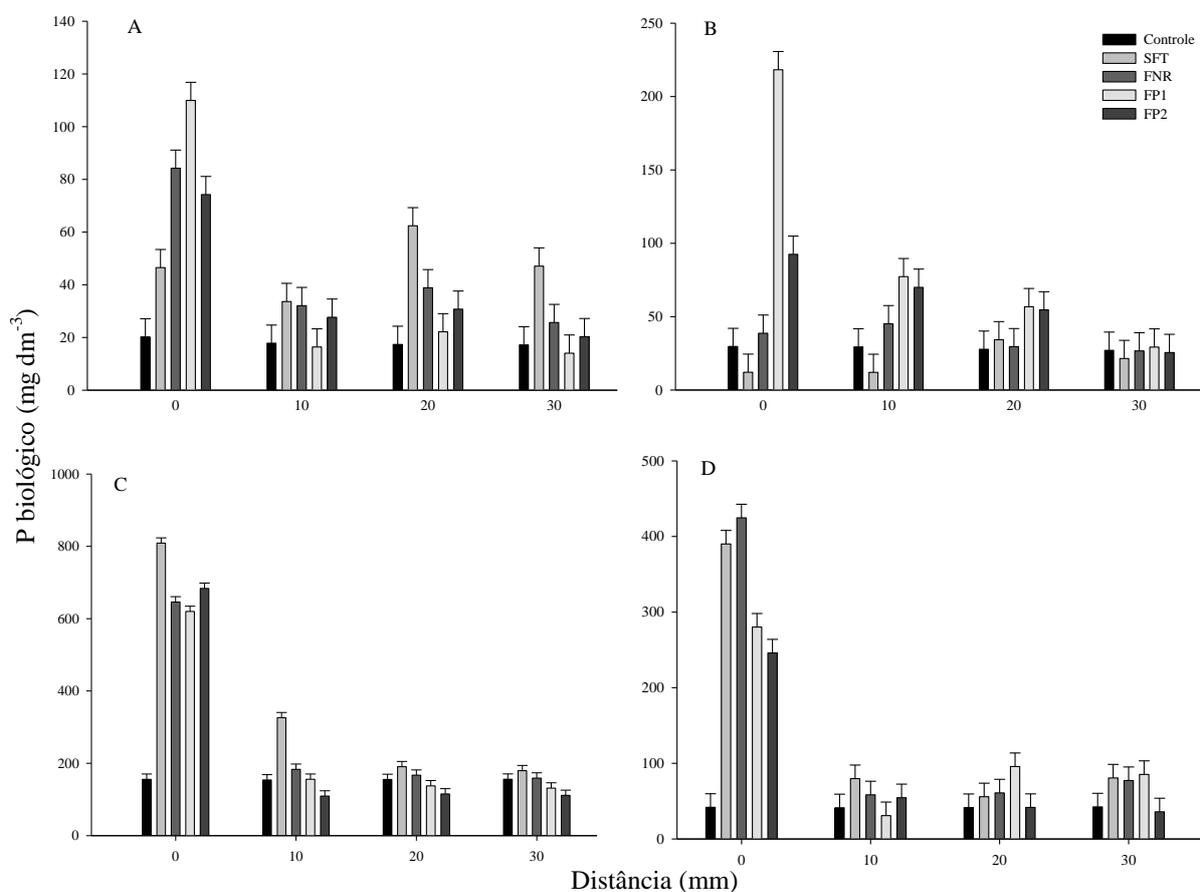


Figura 36. Teores de fósforo biológico no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C - pH 4,2 D - pH 6,0).

Verifica-se que houve grande variação no teor de P orgânico no solo RQ em todas as seções. Na primeira seção onde foram aplicados os fertilizantes, nota-se que o tratamento que recebeu aplicação da fonte alternativa FP1 obteve os maiores teores de P orgânico nas duas condições de pH, sendo maior onde houve adição de hidróxido de cálcio, 110 e 218 mg dm<sup>-3</sup> respectivamente, o que pode ser justificável de acordo com Troeh e Thompson (2005) que apontam que o P orgânico pode ser mais dissolvido quimicamente se o pH do meio for alto, possivelmente pela maior atividade microbiana.

Verifica-se que nas demais seções, até mesmo na mais distante do fertilizante houve variação no teor de P biológico. Contudo não necessariamente este acontecimento esteja ligado ao tipo do fertilizante e ao seu caminhamento no solo, mas pode ser justificado devido ao processo de mineralização da matéria orgânica que durante o período de incubação ocorreu naturalmente em todas as seções amostradas. Além de que, durante a decomposição biológica, ocorre a mineralização bioquímica, onde os microrganismos liberam enzimas fosfatases, as quais retiram o fósforo dos compostos orgânicos. Este mecanismo ocorre principalmente em resposta a deficiência de fósforo (NOVAIS e SMYTH, 1999), como é o caso das seções mais distantes da seção central onde foi aplicado o fertilizante.

Observa-se que no solo RQ a quantidade de fósforo orgânico proporcionado em todos os tratamentos é bem menor que o P orgânico presente no solo LVdf. Isso se deve principalmente pela diferença na quantidade de matéria orgânica presente nos dois solos, já que no solo RQ os teores de matéria orgânica eram de  $11 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto que no solo LVdf era de  $22 \text{ g kg}^{-1}$ .

Em estudo das formas de fósforo em solos com diferentes teores de argila submetido aos sistemas de cultivo convencional e em sistema de plantio direto (onde há maior concentração de matéria orgânica), Rheinheimer (2000) observou em todos os solos que no sistema de plantio direto houve aumento de fósforo nas camadas superficiais, ou ainda, próximas da aplicação do fertilizante, principalmente nas formas inorgânicas disponíveis (PiRTA e Pibic) e moderadamente disponíveis (Pihid e PiHCl), permitindo a manutenção de teores de fósforo na solução do solo mais elevados do que no convencional. O mesmo autor ainda notou que para o solo com maiores teores de argila e de Fe, como é o caso do solo LVdf não houve aumento dos teores de P orgânico sob SSD, discordando com os dados do presente trabalho. Neste caso, contudo não houve um objeto de estudo semelhante, pois as condições deste experimento foram controladas em laboratório, entretanto o que discorda do presente estudo é pelo fato de que o solo com maior teor de argila proporcionou os maiores teores de P biológico, diferindo dos resultados encontrados por Rheinheimer (2000). O mesmo autor observou também que para os solos de textura mais leve, a adoção do SSD, principalmente com utilização de rotações de culturas com grande capacidade de produção de resíduos, promoveu aumentos dos teores de P orgânico, o que justifica que o teor de matéria orgânica proporciona conseqüentemente maiores teores de P.

## 21.6 P geoquímico

Foi observado que o fósforo geoquímico foi influenciado pelos tratamentos, havendo interação entre os fatores fontes de fósforo, distância do fertilizante e condição de pH (Figura 37).

Observa-se que no solo arenoso o P geoquímico manteve-se com valores semelhantes nas duas condições de pH, na primeira e na segunda seção, com variação dos teores quando foi utilizada as diferentes fontes fosfatadas. Nas demais seções, onde não foi aplicado fertilizante, como consequência da estabilidade no P residual, pois a maior parte do P geoquímico é composto de P residual, não houve diferença entre os tratamentos para ambos os solos.

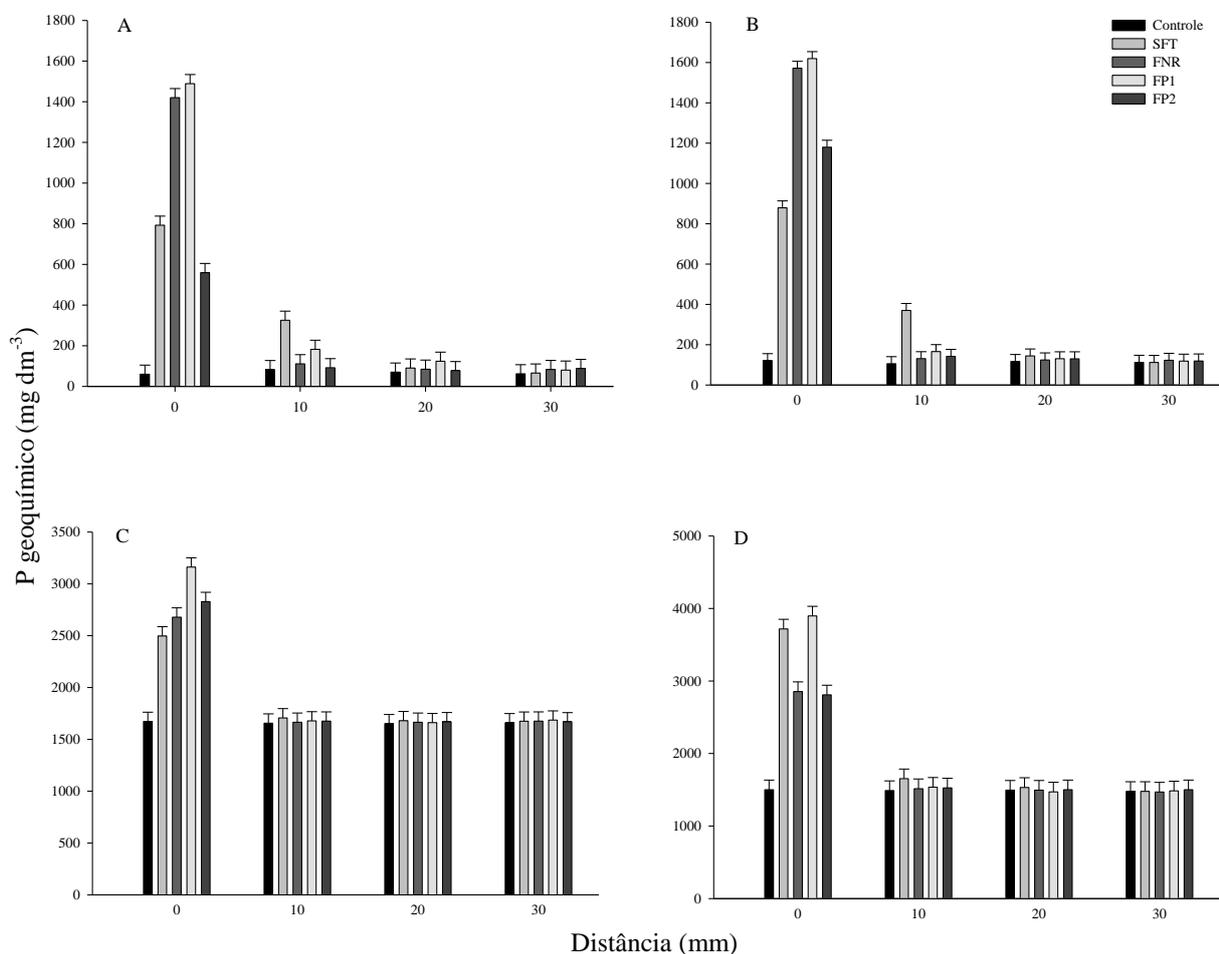


Figura 37. Teores de fósforo geoquímico no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C - pH 4,2 D - pH 6,0).

Verifica-se que no solo arenoso, as fontes que proporcionaram a maior parte do fósforo na forma inorgânica, independente de sua labilidade, foram o fosfato natural reativo e o FP1, nas duas condições de pH. Nos tratamentos onde foi

utilizado o FNR em condições de pH ácido, observa-se teores de  $1420 \text{ mg dm}^{-3}$ , enquanto que em condições de pH corrigido os teores determinados foram de  $1572 \text{ mg dm}^{-3}$ . Contudo, tais teores, como já foi dito anteriormente, não demonstram que este fósforo esteja prontamente disponível para as plantas, já que foi observado que a grande porção do fósforo advindo desta fonte foi extraído pelo extrator HCl que extrai formas de fósforo não lábeis, principalmente ligadas a cálcio.

Ainda no solo arenoso, observa-se que a fonte FP1 foi a que proporcionou os maiores teores de P inorgânico, quando comparada as demais nas duas condições de pH avaliadas no experimento. Em condições de pH ácido, os teores atingidos foram de  $1489 \text{ mg dm}^{-3}$  e em condições de pH corrigido foram de  $1620 \text{ mg dm}^{-3}$ . Contudo, essa fonte difere do fosfato natural reativo, pelo fato de que a fração de P inorgânico proporcionado por esta fonte, são frações mais lábeis, como observado nos extratores como RTA e  $\text{NaHCO}_3$ , onde a fonte FP1 proporcionou teores maiores ou semelhantes à fonte solúvel de referência SFT.

O solo LVdf mostrou valores superiores de P geoquímico que o RQ, essencialmente na primeira seção onde foi aplicado o fertilizante nas duas condições de pH. Um leve incremento do P geoquímico proporcionado pela fonte SFT, foi observado na segunda seção avaliada no experimento em condição de pH corrigido, demonstrando que o P inorgânico proveniente desta fonte caminhou alguns milímetros no solo. Isso ocorreu possivelmente porque em condições de pH corrigido uma fonte solúvel como é o caso do SFT, sofre menor adsorção por óxidos de ferro e alumínio principalmente, facilitando seu movimento no solo. Nas demais seções, assim como ocorreu com o solo RQ, não foi observada diferença proporcionadas pela aplicação dos fertilizantes do tratamento controle, devido principalmente da consequência da estabilidade no P residual.

Neste solo, observa-se diferença entre as fontes de fósforo na primeira seção, onde foi realizada a aplicação dos fosfatos. Verifica-se que os teores em condições de pH ácido foram menores que os teores determinados em condições de pH corrigido, o que possivelmente ocorreu devido ao favorecimento da adsorção do elemento em condições de solo ácido. Nesta situação, observa-se que a fonte FP1 proporcionou os maiores teores de P geoquímico,  $3162 \text{ mg dm}^{-3}$ , seguida pela fonte FP2 ( $2829 \text{ mg dm}^{-3}$ ) que demonstrou ter maiores teores de P dissolvidos em condição de solo ácido, posteriormente o FNR ( $2679 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e por fim a fonte de solúvel SFT ( $2497 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Em condições de pH corrigido a fonte FP1 também proporcionou os maiores teores de P

inorgânicos ( $3897 \text{ mg dm}^{-3}$ ), seguida pela fonte de referência SFT ( $3717 \text{ mg dm}^{-3}$ ). As fontes FNR e FP2 proporcionaram teores semelhantes de P inorgânico, 2854 e 2808 respectivamente. Como observado por Gatiboni, 2003, isso indica que a utilização do fósforo inorgânico é dependente do seu estoque no solo, o qual pode ser aumentado pela adubação, enquanto que a utilização das formas orgânicas é dependente de outros fatores ambientais que promovam sua mineralização.

### 21.7 P total

O somatório de todas as frações somado ao P residual revelou que os fontes fosfatadas, as condições de pH e a distância do fertilizante influenciaram os teores de fósforo total (Figura 38).

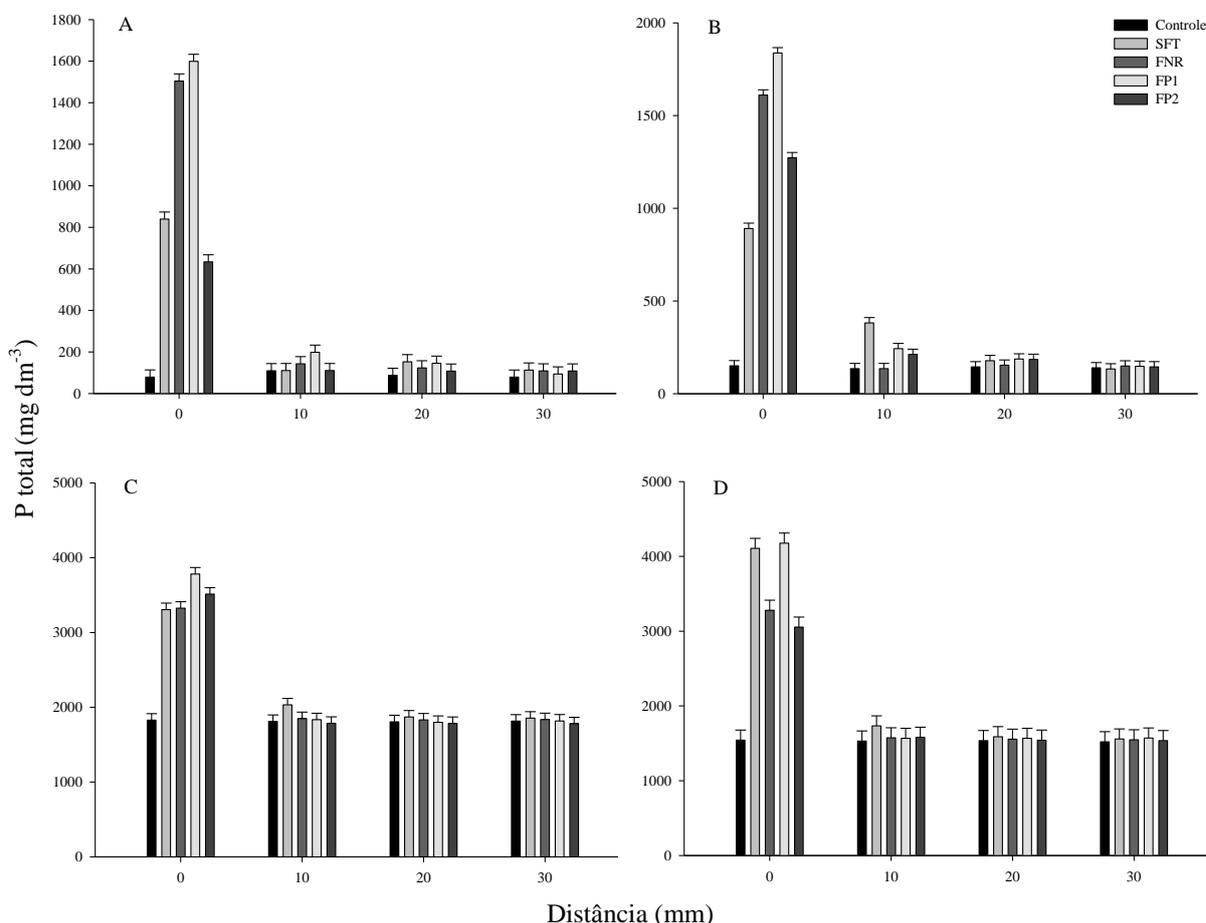


Figura 38. Teores de fósforo total no solo RQ, (A - pH 4,1 B - pH 6,2) e no solo LVdf, (C - pH 4,2 D - pH 6,0)

Verifica-se que em média a fonte alternativa FP1 superou todas as outras nos dois solos, demonstrando ser um fertilizante com grande potencial para ser utilizado, já que em extratores anteriores, grande parte do fósforo disponibilizado por esta

fonte foi proporcionado de maneira lábil e também moderadamente lábil, indicando que além de poder suprir a necessidade de uma cultura disponibilizando o fósforo inicial, há também efeito residual no solo, permitindo que o elemento continue sendo liberado com o passar do tempo.

Observa-se que no solo RQ a fonte FP1 proporcionou em condições de pH ácido,  $1599 \text{ mg dm}^{-3}$  teores totais de P e no solo LVdf teores de  $3782 \text{ mg dm}^{-3}$ . Em condições de acidez corrigida, a mesma fonte proporcionou no solo RQ, teores de P total de  $1838 \text{ mg dm}^{-3}$  e no solo LVdf de  $4177 \text{ mg dm}^{-3}$ . Esta fonte foi muito superior à fonte referência SFT no solo arenoso que atingiu teores totais de P de 839 e 891  $\text{mg dm}^{-3}$  em pH ácido e corrigido respectivamente. No solo argiloso esta mesma fonte foi superior que o SFT em condições de pH ácido, entretanto no tratamento em que houve correção da acidez, a fonte FP1 proporcionou teores totais de P semelhantes a fonte solúvel de referência. Essa concentração do P total é semelhante com a obtida em solos de cerrado por Lilienfein et al. (2000), porém é comum encontrar valores bem mais elevados para essa fração, principalmente em solos cultivados em regiões com clima temperado, onde os teores podem alcançar  $3000 \text{ mg kg}^{-1}$  (FARDEAU, 1996; LAEGREID, 1999).

A fonte FNR proporcionou altos teores de P total nos dois solos e nas duas condições de pH, entretanto, foi observado anteriormente que grande parte do fósforo proveniente desta fonte encontra-se no solo na forma de P não lábil, o que indica o seu uso apenas em conjunto com uma fonte solúvel, já que ao longo do tempo e pela necessidade de reposição de P (fator Q/I), esta fração de P pode se tornar lábil. A fonte FP2 proporcionou maiores teores de P total em condições de acidez corrigida no solo RQ e também no solo LVdf, demonstrando a necessidade de correção de acidez para o melhor aproveitamento desta fonte, contudo, observa-se que em comparação com a outra fonte alternativa FP1, esta fonte não conseguiu atingir teores semelhantes de P.

Em relação ao movimento do P para as seções mais distantes do fertilizante, observa-se que apenas o SFT proporcionou teores de P na segunda seção, demonstrando que houve caminhamento desta fonte em função da umidade do solo, tanto no solo RQ, quanto no solo LVdf. A dissolução da fração de P - água contida no fertilizante na forma granular é geralmente muito rápida, e se completa em questão de horas ou poucos dias. Observaram que o P ( $^{32}\text{P}$ ) se move no solo a 18 mm do grânulo em 4 dias, 22 mm em 15 dias e 24 mm em 23 dias e concluíram que praticamente não há mais nenhum movimento após 30 dias, o que concorda com os resultados

encontrados neste trabalho que verificam o caminhamento do P disponibilizado pelo SFT. Lawton e Vomocil (1954) quantificaram também esta rápida dissolução do P dos grânulos de super fosfato simples nas primeiras seis horas de contato com o solo, período no qual entre 30% e 50% do P se moveu para fora do grânulo. As demais fontes não demonstraram influência no caminhamento e dissolução do fósforo nas seções mais distantes do fertilizante.

Estes fatos comprovam que ocorre rápida dissolução do P - água, porém as reações já na interface grânulo:solo começam a fazer com que a solubilidade destas formas diminua e conseqüentemente sua movimentação. Com o tempo, as reações do P presente na solução com os colóides do solo tornam-se cada vez mais estáveis e irreversíveis, quando na verdade se deseja que o P permaneça em formas disponíveis às plantas, mesmo que estas não sejam necessariamente solúveis em água (SILVA, 2013).

Verifica-se, portanto, que a fonte FP1 proporcionou teores altos de fósforo no solo, o que a torna um potencial fertilizante a ser utilizado já que no geral, apenas 10 a 20% do P adicionado é utilizado pelas plantas logo na mesma safra da aplicação, o restante do P utilizado é fornecido pelo solo (CHIEN et al., 2011). Isso revela a grande importância da disponibilidade de P no solo para um adequado desenvolvimento e determinação da produtividade das culturas. De acordo com Fardeau (1996), o destino dos íons fosfatos adicionados na forma de fertilizantes depende mais das reações com os componentes do solo do que da eficiência de absorção das plantas cultivadas, e por isso a pesquisa em maximizar a absorção de P não deve resultar em avanços tão grandes na melhor eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados. Gahoonia et al. (2000) ainda reforça que o aumento da absorção de P só irá resultar em grandes avanços se estiver correlacionado à mecanismos que alterem a disponibilidade de P no solo.

## **22. CONCLUSÕES**

SFT foi o fertilizante que proporcionou maior movimento do fósforo no solo, contudo apenas para a segunda seção, distante a 10 mm da seção central, provavelmente devido à formação de compostos mais lábeis, nas demais fontes em geral o P permaneceu na região onde o grânulo foi aplicado.

A fonte FP1 foi a fonte alternativa que apresentou comportamento muito parecido e até mesmo superior que a fonte de referência SFT, mesmo sendo um

fertilizante que apresenta menor solubilidade em água. Proporcionou altos teores de P na fração lábil e P total demonstrando um potencial fertilizante a ser utilizado.

### 23. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em condições de fertilidade constituída e em solos cultivados com pastagem, a fonte FP1 é tão eficiente quanto à fonte de referência, superfosfato triplo. Indica-se não haver necessidade de um fertilizante solúvel, pois o uso da fonte FP1 apresenta desempenho agrônômico satisfatório, independente do tipo solo e da cultura, fato proporcionado pela maior quantidade de formas lábeis de fósforo disponibilizadas por essa fonte.

A fonte FP2 não é eficiente para cultivos com cultura de ciclo curto como o milho, independente da condição de fertilidade do solo. Entretanto, em condições de solo com acidez corrigida e cultivado com cultura perene como pastagens, o uso desse fosfato é recomendado já que apresenta índices de eficiência superior ao fosfato acidulado de referência, justificado pela maior quantidade de formas moderadamente lábeis proporcionadas por este fosfato.

O FNR é recomendado apenas para uso em culturas de ciclo longo, justificado pela maior quantidade de formas não lábeis de fósforo proporcionadas por esta fonte, o que conseqüentemente, só estarão disponíveis para a planta após longo período de tempo. Desta forma, a produção de fontes menos solúveis é uma boa alternativa para aquelas reservas fosfáticas que contenham certo grau de impurezas ou para materiais que atualmente são considerados rejeitos e que ainda possuem fósforo em sua composição.

### 24. REFERÊNCIAS

ADEPETU, J. A.; COREY, R. B. Organic phosphorus as a predictor of plant-available phosphorus in soils of southern Nigeria. **Soil Science**, Baltimore, v 122, p. 159-164, 1976.

BECK, M. A.; SANCHES, P. A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic paleudult. **Soil Science**, Baltimore, v 34, p. 1424-1431, 1994.

BLAKE, L. et al. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 254, p. 245–261, 2003.

BOLAN, N.S.; HEDLEY, M.J. Dissolution of phosphate rocks in soils .2. effect of pH on the dissolution and plant availability of phosphate rock in soil with pH dependent charge. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 24, n. 3, p. 125-134, 1990.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 14, n. 4, p. 319-329, 1982.

CANTARUTTI, R.B.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F. et al. .L. Época de aplicação de fosfato natural em relação à calagem, num solo com elevado teor de alumínio trocável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.5, p.129-133, 1981.

CHIEN, S.H.; PROCHNOW, L.I.; TU, S.; SNYDER, C.S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, n. 2, p. 229-255, 2011.

CONDRON, L. M.; GOH, K. M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p.383-395, 1989.

CONDRON, L.M., B.L. TURNER, AND B.J. CADE-MENUN. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In: J.T. Sims and A.N. Sharpley, editors, Phosphorus: Agriculture and the environment. **Agron. Monogr.** 46. ASA, CSSA, and SSSA, Madison WI. p. 87–121, 2005.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H.A. literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 2/4, p.197-214, 1995.

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v 29, p. 83-117, 1977.

DAROUB, S. H.; PIERCE, F. J.; ELLIS, B. G. Phosphorus fractions and fate of phosphorus<sup>33</sup> in soils under plowing and no-tillage. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 1, p. 170-176, Jan./Feb. 2000.

DICK, W.A. & TABATABAI, M.A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **J. Environ. Qual.**, 6:82-85, 1977.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils: An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 45, n. 2, p. 91-100, 1996.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R. L. (Ed) **Soil Testing and Plant Analysis**, 3 ed. Madison. p. 141-180, 1990.

GAHOONIA, T.S.; ASMAR, F.; GIESE, H.; GISSEL-NIELSEN, G.; NIELSEN, N.E. Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments. **European Journal of Agronomy**, v.12, p.281-289, 2000.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v.8, p.141-187, 2013.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas.** Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 245 p. (Tese de Doutorado).

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.31, p.691-699, 2007.

GOEDERT, W.J; LOBATO, E. Eficiência agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.15, n.3, p.311-318, 1980.

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, v. 33, p. 357-362, 2009.

GRAETZ, D.A.; NAIR, V.D. Phosphorus sorption isotherm determination. In: PIERZYNSKI, G.M. (Ed.) **Methods of Phosphorus Analysis for soils, sediments, residuals and waters.** USDA-CSREES Regional Committee, 2000. p. 35-38. (Southern cooperative series bull.,396).

GUO, F.; YOST, R. S.; HUE, N. V.; EVENSEN, C. I.; SILVA, J. A. Changes in phosphorus fractions under intensive plant growth. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 64, p. 1681-1689, 2000.

GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Sci.**, 163:822-833, 1998.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management.** 7<sup>th</sup> ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. 515p.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

HETTIARACHCHI, G.M.; McLAUGHLIN, M.J.; SCHECKEL, K.G.; CHITTLEBOROUGH, D.J.; NEWVILLE, M.; SUTTON, S.; LOMBI, E. Evidence for Different Reaction Pathways for Liquid and Granular Micronutrients in a Calcareous Soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.72, n.1, p. 98-110, 2008.

LAEGREID, M.; BOCKMAN, O. C.; KAARSTAD, O. **Agriculture fertilizers and environment.** Wallingford: CAB, 1999. 294p.

LAWTON, K.; VOMOCIL, J.A. The dissolution and migration of phosphorus from granular superphosphate in some Michigan soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 18, n.1, p. 26-32, 1954.

LILIENFEIN, J. et al. Soil acidification in *Pinus caribaea* forests on Brazilian savanna Oxisols. **Forest Ecology and Management**, v. 128, p. 145-157, 2000.

- LOMBI, E.; McLAUGHLIN, M.J.; JOHNSTON, C.; ARMSTRONG, R.D.; HOLLOWAY, R.E. Mobility and lability of phosphorus from granular and fluid monoammonium phosphate differs in a calcareous soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 4, p. 682-689, 2004.
- LOMBI, E.; SCHECKEL, K.G.; ARMSTRONG, R.D.; FORRESTER, S.; CUTLER, J.N.; PATERSON, D. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil: A synchrotron- based investigation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 7, p. 2038- 2048, 2006.
- MAROKO, J. B.; BURESH, R. J.; SMITHSON, P. C. Soil phosphorus fractions in unfertilized fallow-maize systems on two tropical soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 63, p. 320-326, 1999.
- McLAUGHLIN, M.J.; McBEATH, T.M.; SMERNIK, R.; STACEY, S.P.; AJIBOYE, B.; GUPPY, C. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils implications for fertiliser management and design: an Australian perspective. **Plant and Soil**, The Hague, v. 349, n. 1-2, p. 69-87, 2011.
- MULLINS, G.L.; SIKORA, F.J.; BARTOS, J.M.; BRYANT, H.H. Plant availability of phosphorus in the water-insoluble fraction of commercial triple superphosphate fertilizers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 1469-1472, 1990.
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural water. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 27, p. 31-36, 1962.
- NAHAS, E. M.; CENTURION, J. F.; ASSIS, L. C. Microrganismos solubilizadores de fosfato e produtores de fosfatases de vários solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.1, p.43-48, 1994.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Universidade Federa de Viçosa, Viçosa, MG. 399p., 1999.
- OLIBONE D; ROSOLEM C.A. Adubação fosfatada e formas de fósforo num Latossolo sob sistema de semeadura direta. **Scientia Agrícola**, 67:465-471, 2010.
- OLIVEIRA, A. J. **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília: Embrapa, 1982. 326p.
- PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 149–155, 2009b.
- PAVINATO, P.S. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 2007. 145p. (Tese de Doutorado).

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no Solo decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.911-920, 2008.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 343p. 1991.

REDEL, Y. D. et al. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, p. 388-396, 2007.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RICHTER, D. D.; BABBAR, L. I. Soil diversity in the tropics. **Advances in Ecological Research**, London, v. 21, p. 316-389, 1991.

ROSEMARIN, A.; BRUIJNE, I.; CALDWELL, I. **The Next Inconvenient Truth – Peak Phosphorus**. The Broker, Stocolmo, v. 3, n. 15, p. 6-9, 2009.

SELBACH, P. A. Acidez dos solos e atividade microbiana. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEIS, S. J.; BECKER, F. C. (Eds.) **Corretivos da acidez do solo**. Santa Maria, 1989. p. 62-73.

SHARPLEY, A. N.; TIESSEN, H.; COLE, C. V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, p. 362-365, 1987.

SILVA, R. C., 2013. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados com solubilidade variada**. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2013.

SIMPSON, M. et al. Effects of long-term grassland management on the chemical nature and bioavailability of soil phosphorus. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 48, n. 5, p. 607-611, 2012.

STEWART, J. W. B.; SHARPLEY, A. N. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: FOLLETT, R. F.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V.; POWER, J. F. (Eds.) **Soil Fertility and organic matter as critical components of production systems**. SSSA. Madison, 1987, p. 101-121.

STEWART, J. W. B.; HEDLEY, J. M.; CHAUHAN, B. S. The immobilization, mineralization and redistribution of phosphorus in soils. In: WESTERN CANADA PHOSPHATE SYMPOSIUM, 1980, Alberta. **Proceedings...** Alberta: Soil Science Society of America, 1980. p. 276-306.

TATE, K. R. NEWMAN, R. K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zeland tussock gassland.. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v 14, p. 191-196, 1982.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S. & CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil Till. Res.**, 124:57-67, 2012b.

TIESEN, H.; ABEKOE, M. K.; SALCEDO, I. H.; OWUSU-BENNOAH, E. Reversibility of phosphorus sorption by ferruginous nodules. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 153, p. 113-124, 1993.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Soils and soil fertility**. New York: Oxford University Press, 1.ed. 1993. 462p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati, 1971.