



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO SOLO SOB DOIS  
SISTEMAS DE CULTIVO E DIFERENTES MANEJOS DA  
ADUBAÇÃO FOSFATADA**

**RAFAEL DE SOUZA NUNES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**BRASÍLIA – DF  
FEVEREIRO/2010**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO SOLO SOB DOIS SISTEMAS DE  
CULTIVO E DIFERENTES MANEJOS DA ADUBAÇÃO FOSFATADA**

**Rafael de Souza Nunes**

**ORIENTADOR: Wenceslau J. Goedert**  
**CO-ORIENTADOR: Djalma Martinhão Gomes de Sousa**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA**

**PUBLICAÇÃO: 013/2010**

**BRASÍLIA/DF**  
**FEVEREIRO/2010**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO SOLO SOB DOIS SISTEMAS DE  
CULTIVO E DIFERENTES MANEJOS DA ADUBAÇÃO FOSFATADA**

**Rafael de Souza Nunes**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À FACULDADE DE  
AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA DA UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.**

**APROVADA POR:**

---

**Wenceslau J. Goedert, PhD, Professor Associado (Universidade de  
Brasília - UnB)**

**CPF: 005799550-87**

**E-mail: [goedert@unb.br](mailto:goedert@unb.br)**

**(Orientador)**

---

**Sebastião Alberto de Oliveira, Doutor, Professor Associado (Universidade  
de Brasília - UnB)**

**CPF: 052361771-20**

**E-mail: [oliveira@unb.br](mailto:oliveira@unb.br)**

**(Examinador Interno)**

---

**João de Deus Gomes dos Santos Júnior, Doutor, Pesquisador (Embrapa  
Cerrados - CPAC)**

**CPF: 600450861-68**

**E-mail: [jdsantos@cpac.embrapa.br](mailto:jdsantos@cpac.embrapa.br)**

**(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 24 de fevereiro de 2010.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Nunes, Rafael de Souza

Distribuição do fósforo no solo sob dois sistemas de cultivos e diferentes manejos da adubação fosfatada. / Rafael de Souza Nunes; orientação de Wenceslau J. Goedert; co-orientação de Djalma M. G. de Sousa – Brasília, 2010.

88 p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2010.

1. Fontes de fósforo 2. Modos de aplicação de fósforo  
3. Sistema de preparo convencional 4. Plantio direto 5. Extratores de fósforo do solo 6. Cerrado I. Goedert, W.J. II. PhD.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NUNES, R.S. **Distribuição do fósforo no solo sob dois sistemas de cultivo e diferentes manejos da adubação fosfatada.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2010, 88 p. Dissertação de Mestrado.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Rafael de Souza Nunes

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Distribuição do fósforo no solo sob dois sistemas de cultivo e diferentes manejos da adubação fosfatada.

GRAU: Mestre ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Rafael de Souza Nunes

CPF 013080541-65

QN 07 Conjunto 14 Casa 31, Riacho Fundo I.

71805-714 - Brasília/DF - Brasil

(61) 30367230/96663802 e rafaelsouza\_nunes@yahoo.com.br.

**Dedico,  
À Deus, meu pais e amigos:  
presentes em todos os  
momentos.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida eterna em Cristo Jesus, nosso Senhor (Rom 6:23).

À minha mãe Marly e minha irmã Taynã, pela presença, força e compreensão em todos os momentos.

Ao meu pai Wagner Nunes (*in memorium*), pelo exemplo de dedicação no trabalho e coragem diante das circunstâncias da vida.

Ao meu tio Vandair Nunes, pelo apoio e incentivo a cada novo desafio.

Ao meu orientador, professor Dr. Wenceslau J. Goedert, pelo exemplo de dedicação e amor ao ensino. Pelo incentivo em seguir, e às vezes esperar, mas nunca desistir. Pela orientação e confiança em cada momento deste projeto.

Ao meu co-orientador, pesquisador Msc Djalma Martinhão Gomes de Sousa, pela amizade formada e solidificada a cada dia. Pela oportunidade de aprender que a vida é mais do que aquilo que se vê. Pelo exemplo de sinceridade, compromisso, ética e serviço à sociedade. Por me ensinar a amar a Ciência do solo. Pela área experimental do trabalho, discussões a respeito da condução do mesmo e pela sempre disposição em ensinar.

Ao pesquisador Dr. Thomaz Adolfo Rein, pelos anos de convívio na Embrapa Cerrados, sempre disposto a ajudar na minha formação acadêmica.

Ao professor Dr. Sebastião Alberto Oliveira, por contribuir em minha formação na Ciência do solo e pela disponibilidade em participar da banca.

Ao pesquisador Dr. João de Deus Gomes dos Santos Junior, pela disponibilidade em participar da banca, contribuindo para a qualidade na avaliação do trabalho.

Ao técnico agrícola da área de solos da Embrapa Cerrados Valmir Vieira de Sousa pela amizade, exemplo de dedicação e pela coordenação de todas as etapas dos trabalhos de campo.

Aos operários de campo da área de solos da Embrapa Cerrados, Pedro das Neves, José Ailson Rodrigues, Neandro José da Silva e José Dourado, pelo auxílio nas amostragens e demais serviços de campo e aprendizagem de maneira descontraída.

Aos técnicos dos Laboratório de Química do Solo da Embrapa Cerrados, pela colaboração e apoio na execução das análises necessárias.

À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília pela oportunidade de cursar o mestrado em Agronomia e realizar esse sonho.

À CAPES pelos recursos financeiros.

À Embrapa Cerrados, por disponibilizar suas instalações e material para a realização deste trabalho.

Enfim, meu muito obrigado a todos que contribuíram para a execução deste trabalho e para minha formação pessoal e acadêmica.

# DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO SOLO SOB DOIS SISTEMAS DE CULTIVO E DIFERENTES MANEJOS DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

## RESUMO

Os distintos sistemas de cultivo e manejos da adubação fosfatada influenciam na disponibilidade do fósforo (P) no solo, seu acesso pelas plantas e por fim na produção das culturas. Em virtude disso há a necessidade de se avaliar a distribuição do P no perfil do solo em experimentos de longa duração, para que se possa compreender o impacto de cada sistema de cultivo e manejo da adubação neste processo. Diante disso, foi utilizado um experimento localizado na Embrapa Cerrados, em Planaltina - DF, em um Latossolo Vermelho cultivado por 14 anos com as culturas de soja e milho no verão e milheto como planta de cobertura nas seis últimas safras de inverno, recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo ou fosfato natural reativo, aplicados no sulco de semeadura ou a lanço, sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), tendo o cerrado nativo como referência. Foi avaliada a distribuição do P em sete camadas de solo (0 a 2,5 cm; 2,5 a 5 cm; 5 a 10 cm; 10 a 20 cm; 20 a 30 cm, 30 a 40 cm e 40 a 50 cm) utilizando três métodos de extração de P disponível no solo: Mehlich I, usado como padrão na maior parte do território brasileiro; o Bray 1, indicado para as fontes apatíticas de P; e Resina, usado como padrão em alguns estados do sul do Brasil. No 14º ano de cultivo foi avaliado o rendimento de grãos de soja. Os resultados foram analisados estatisticamente para comparações quanto à distribuição do P no perfil do solo e quanto ao rendimento de grãos. A distribuição de P extraível no solo após 14 anos de cultivo é influenciada pela fonte e modo de aplicação do fertilizante fosfatado, até 10 cm de profundidade no SPD e até 20 cm de profundidade no SPC. No SPC há um leve gradiente em profundidade enquanto no SPD há um forte gradiente, principalmente para aplicações a lanço, sendo os maiores teores de P encontrados na camada 0-2,5 cm para os dois modos de aplicação. O SPD apresenta maiores teores de P até 10 cm de profundidade porém menores teores na camada de 10-20, em comparação com o SPC. Apesar do efeito do manejo da adubação fosfatada na distribuição do P no solo, o rendimento de grãos de soja no 14º ano da área foi afetado apenas pelo sistema de cultivo, tendo o SPD produzido 15,5 % mais grãos do que o SPC.

**Termos de Indexação:** fontes de fósforo, modos de aplicação de fósforo, sistema de preparo convencional, plantio direto, extratores de fósforo do solo, Cerrado.

# PHOSPHORUS DISTRIBUTION IN SOIL UNDER TWO SYSTEMS AND DIFFERENT MANAGEMENT OF PHOSPHATE FERTILIZATION

## ABSTRACT

The distinct cropping systems and managements of phosphate fertilization influence in the availability of phosphorus (P) in the soil, his access to the plants and finally in the crop yield. Because it there is the need to evaluate the distribution of P in the soil profile in long-term experiments, so that we can understand the impact of each cropping system and fertilizations management in this process. Given this, it was used an experiment located at Embrapa Cerrados, in Planaltina - DF, in an Oxisoil cultivated for 14 years with the soybean and corn in summer and millet as cover crop in the last six seasons of winter, receiving  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$  of  $\text{P}_2\text{O}_5$  as superphosphate or phosphate rock, applied in seed furrows or broadcast under conventional tillage (CT) or no-tillage (NT) and the native vegetation as a reference. It was evaluated the distribution of P in seven soil layers (0 to 2.5 cm, 2.5 to 5 cm, 5 to 10 cm, 10 to 20 cm, 20 to 30 cm, 30 to 40 cm and 40 to 50 cm ) using three methods of extraction of available soil P: Mehlich I, used as standard in most of Brazil, Bray 1, indicated to the sources for apatite P and Resin, used as standard in some states in southern Brazil. In the 14<sup>th</sup> year of cultivation it was evaluated the yield of soybeans. The results were statistically analyzed to compare about the distribution of P in the soil profile and about the yield. The distribution of extractable P in the soil after 14 years of cultivation is influenced by source and way of application of phosphate fertilizer up to 10 cm depth in NT and 20 cm depth at CT. In the CT there is a slight gradient in depth while in the NT there is a strong gradient, especially for applications in broadcast, and the highest levels of P found in the 0-2.5 cm layer for the two modes of application. The NT has increased levels of P up to 10 cm depth but lower levels at 10-20, compared with the CT. Although the effect of the management of phosphorus in the distribution of P in soil, grain yield of soybeans in 14 years the area was affected by cropping system, and the NT produced 15.5% more grain than the CT.

**Index Terms:** phosphorus sources, ways of phosphorus application, conventional tillage, no-tillage, extractors of phosphorus of the soil, Cerrado.



## SUMÁRIO

Capítulos/Sub-capítulos	Página
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Fósforo e produção agrícola no Cerrado .....	4
2.2 Absorção de P pelas plantas .....	6
2.3 Distribuição do fósforo no solo e produção agrícola .....	8
2.3.1 Sistema de cultivo .....	9
2.3.2 Modos de aplicação do fertilizante fosfatado .....	12
2.3.3 Fonte do fertilizante fosfatado .....	16
2.4 Avaliação da disponibilidade de P no solo .....	20
3 OBJETIVOS E HIPÓTESES.....	26
3.1 Objetivo Geral.....	26
3.2 Objetivos específicos.....	26
3.3 Hipóteses.....	26
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27
<b>CAPÍTULO ÚNICO .....</b>	<b>40</b>
1 INTRODUÇÃO .....	41
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
2.1 Descrição do experimento .....	43
2.2 Seleção dos tratamentos e amostragem do solo .....	46
2.3 Procedimentos analíticos .....	49
2.4 Análises estatísticas .....	50
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
3.1 Distribuição de P extraível no solo .....	54
3.1.1 Efeito geral da adubação fosfatada .....	54
3.1.2 Efeito das fontes de fertilizante fosfatado .....	55
3.1.3 Efeito do modo de aplicação do fertilizante fosfatado.....	60
3.1.4 Efeito do sistema de cultivo .....	67
3.2 Distribuição do P no solo e rendimento de grãos.....	70
3.3 Distribuição de matéria orgânica do solo e relações com o P no solo .....	76
4 CONCLUSÕES .....	80
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 01. Descrição dos tratamentos originais de experimento visando avaliar efeito de fontes e doses de adubo fosfatado nas produções agrícolas sob sistemas de preparo convencional e plantio direto. ....	44
Tabela 02. Análise química e granulométrica do solo antes da implementação do experimento, na camada de 0 cm a 20 cm .....	45
Tabela 03. Cronograma de cultivos principais e de cobertura no experimento em estudo .....	45
Tabela 04. Características dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento .....	46
Tabela 05. Classes de disponibilidade <sup>(1)</sup> de P extraível por Mehlich I para culturas anuais em sequeiro no Cerrado para sete camadas de solo sob duas condições: cerrado nativo e média dos tratamentos adubados após 14 anos de cultivo. ....	53
Tabela 06. Significâncias (Pr > F) dos efeitos de sistema de cultivo (Sist), fonte de fósforo (Fonte), modo de aplicação do adubo fosfatado (Modo), profundidade de amostragem (Prof) e diversas interações possíveis para os teores de fósforo extraível por Mehlich-I, Resina e Bray 1, em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob dois sistemas de cultivo (sistema de preparo convencional ou sistema plantio direto) e recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> em duas fontes (superfosfato triplo ou fosfato natural reativo) e em dois modos de aplicação (lanço ou sulco). ....	54
Tabela 07. Distribuição do P extraível no solo avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 em um Latossolo cultivado por 14 anos recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo ou fosfato natural reativo independente do modo de aplicação e sistema de preparo (média entre as aplicações a lanço e no sulco sob sistema de preparo convencional e plantio direto). ....	56
Tabela 08. Distribuições do P extraível avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), independente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco). ....	59
Tabela 09. Média ponderada até 20 cm dos teores de P avaliados por três extratores em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) independente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco). ....	60

Tabela 10. Distribuição até 50 cm de P avaliados por três extratores em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> aplicados a lanço ou no sulco de semeadura independente da fonte do fertilizante e sistema de preparo (média entre superfosfato triplo e fosfato natural reativo sob sistema de preparo convencional e plantio direto). .....	62
Tabela 11. Média ponderada até 20 cm dos teores de P avaliados por três extratores em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional ou plantio direto recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> aplicados a lanço ou no sulco de semeadura independente da fonte do fertilizante (média entre tratamentos que receberam superfosfato triplo e fosfato natural reativo). .....	63
Tabela 12. Distribuições do P extraível avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) e plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> aplicados a lanço e no sulco de semeadura independente da fonte do fertilizante (média entre tratamentos que receberam superfosfato triplo e fosfato natural reativo). .....	64
Tabela 13. Distribuição até 50 cm de profundidade do P extraível avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1, em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , independente da fonte e modo de aplicação (média entre os tratamentos que receberam fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados a lanço e no sulco), tendo o cerrado nativo como referência. ....	68
Tabela 14. Estoque até 20 cm de profundidade de P extraível em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional ou sistema plantio direto recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), independente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco). .....	69
Tabela 15. Distribuições do P extraível por Mehlich I em camadas de solo até 50 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura. ....	71
Tabela 16. Distribuições do P extraível por Resina em camadas de solo até 50 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura. ....	71

Tabela 17. Distribuições do P extraível por Bray 1 em camadas de solo até 50 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura. ....	72
Tabela 18. Estoque de P extraível avaliado por Mehlich I em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura. ....	73
Tabela 19. Estoque de P extraível avaliado por Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura. ....	74
Tabela 21. Estoque de matéria orgânica do solo em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> em duas fontes de fósforo (fosfato natural reativo e superfosfato triplo) e dois modos de aplicação (sulco e lanço) (média entre fontes e modos para o mesmo tratamento). ....	77
Tabela 22. Distribuição de matéria orgânica do solo até 50 cm de profundidade em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob Sistema de Preparo Convencional e Sistema Plantio Direto recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> na forma de fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados no sulco e lanço (média entre fontes e modos para o mesmo tratamento), tendo o cerrado nativo como referência. ....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 01. Croqui da área experimental original com os tratamentos selecionados para estudo.....	47
Figura 02. Exemplo de coleta de 5 sub-amostras da linha de plantio em direção às entre-linhas. ....	48
Figura 03. Distribuições do P extraível em um Latossolo Vermelho muito argiloso sob vegetação natural de cerrado e cultivado por 14 anos, avaliado por Mehlich I (a), Resina (b) e Bray 1 (c). O tratamento adubado corresponde à média entre sistema de preparo convencional (SPC) e sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> como superfosfato triplo e fosfato natural reativo, aplicados a lanço na superfície e no sulco de semeadura. ....	52
Figura 04. Distribuição de matéria orgânica do solo até 50 cm de profundidade em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> , independente da fonte e modo de aplicação (média entre tratamentos recebendo fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados a lanço e no sulco), tendo o cerrado nativo como referência. ....	79
Figura 05. Distribuição até 50 cm de profundidade do P extraível avaliado por Mehlich I em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> , independente da fonte e modo de aplicação (média entre tratamentos recebendo fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados a lanço e no sulco), tendo o cerrado nativo como referência.....	79

## 1 INTRODUÇÃO

Antes da década de 1960 a produção agropecuária no Cerrado era ínfima tendo como principal atividade a pecuária extrativista. Neste período a agricultura brasileira caracterizava-se, principalmente, por cultivos extrativistas nos solos férteis das regiões litorâneas, que após terem suas reservas de nutrientes esgotadas eram abandonados.

Durante as décadas de 1960 e 1970 a demonstração da possibilidade de recuperar os solos esgotados e tornar produtivos os solos do Cerrado, mediante a correção da acidez do solo e a adubação, permitiu o início da ocupação agrícola desta região, que apresentava como principais dificuldades a elevada acidez do solo e os baixos teores de nutrientes, em especial o fósforo (P).

Atualmente o Cerrado apresenta-se como uma das principais regiões agrícolas do País, respondendo por grande parte dos grãos, fibras e carne produzidos.

Uma vez que os solos do Cerrado oferecem, em condições naturais, baixa disponibilidade de P para o favorável desenvolvimento de praticamente todas as plantas cultivadas para produção de alimentos, fibras e carne, torna-se necessária adição de fertilizantes fosfatados ao solo primeiramente, visando elevar esse nível de disponibilidade a valores aceitáveis antes do início do sistema produtivo e em seguida mantendo-o ao longo das safras agrícolas, por meio de adições periódicas que reponham, ao menos, aquilo que foi retirado por ocasião das colheitas.

No entanto, nessa região, diversos fatores interferem para que a eficiência desse processo, que constitui a construção da fertilidade do solo e sua manutenção ao longo do tempo, seja baixa. O principal deles é a elevada capacidade de retenção de P na fase sólida desses solos, devido ao elevado conteúdo de óxidos de ferro e alumínio, capazes de reter íons fosfato em formas de baixa labilidade. Nesse sentido, após a dissolução dos adubos fosfatados adicionados, a maior parte do fósforo é adsorvido à fase sólida, formando compostos de solubilidade variáveis. Além disso, práticas como o revolvimento anual expõe o fósforo disponível a novos sítios de adsorção, reduzindo sua disponibilidade para as plantas. Isso resulta num requerimento de grandes aportes de P na fase de correção, acima das quantidades necessárias para formação da planta, bem como de adições anuais acima da exportação das culturas visando compensar a capacidade dreno do solo que é bem maior do que a da planta e elevando consideravelmente o custo de produção.

A partir da década de 1970, a produção agrícola brasileira, que era realizada sob sistema de preparo convencional (SPC), passa a gradativamente adotar o sistema plantio direto (SPD) devido às inúmeras vantagens desse sistema, como acúmulo de matéria orgânica, menor temperatura e maior umidade volumétrica da camada superficial, redução da perda de solo e nutrientes por erosão, proporcionando uma nova dinâmica de fertilidade do solo. No SPD, uma importante alteração que ocorre é o acúmulo gradual de nutrientes nas camadas superficiais, devido a aplicação de fertilizantes e corretivos nessa região, bem como da ciclagem de nutrientes. Uma vez que o P apresenta baixa mobilidade no solo e baixíssima disponibilidade nos solos oxídicos, isso pode afetar o suprimento das plantas, já que a absorção das raízes é diretamente dependente do volume de solo adubado, ou seja da distribuição dos teores de P no perfil.

Para que ocorra adequada absorção de P, crescimento e produtividade das culturas e por fim elevada eficiência dos fertilizantes fosfatados, estes devem ser aplicados de maneira adequada no solo, permitindo sua melhor localização em relação às raízes das plantas.

Os modos de aplicação mais utilizados são a lanço, na superfície, com ou sem incorporação, no sulco de plantio, em cova e em faixas. O manejo preferencial da adubação fosfatada pelos produtores da região do Cerrado constitui de aplicações no sulco de semeadura de fontes solúveis de P. Apesar de ampliar o gradiente natural de P no perfil do solo, principalmente sob SPD, aplicações de adubos fosfatados na superfície constituem uma interessante alternativa em sistemas de produção que se beneficiam pela adubação separada do plantio, antecipada ou após este, como em regiões produtoras de sementes de soja ou aquelas em que há possibilidade de realizar safrinhas.

A escolha da fonte de P a ser utilizada normalmente depende do custo por unidade de  $P_2O_5$  e de sua eficiência agronômica (capacidade de suprir as plantas), sendo que esta é influenciada pela solubilidade da fonte empregada, por sua granulometria, por propriedades do solo como pH, teores de cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e P, capacidade de retenção do P, teor de matéria orgânica (MOS) e capacidade de troca de cátions (CTC), pelas práticas de manejo como sistema de cultivo e modo de aplicação, que determinam a grandeza do contato do fertilizante com o solo, influenciando, conseqüentemente, na taxa de reação entre eles e pela espécie empregada (anual, perene ou pastagem).

Os fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água são os mais utilizados na agricultura mundial devido a sua elevada eficiência agronômica, para

quaisquer condições de solo e de cultura, correspondendo a 95% do  $P_2O_5$  utilizado na agricultura brasileira (51% como superfosfato simples - SFS e superfosfato triplo - SFT e 44% como fosfato monoamônico - MAP e fosfato diamônico - DAP). No entanto, é também bastante conhecido que essas fontes, quando adicionadas aos solos tropicais ácidos, de alta capacidade de fixação de P, são rapidamente convertidas a formas indisponíveis às plantas, podendo ter sua eficiência diminuída ao longo do tempo.

Uma alternativa que tem crescido é quanto ao uso de fosfatos naturais reativos (FNR), que limitam a adsorção específica pelas argilas promovendo solubilização gradual do P e podendo proporcionar uma maior eficiência do fertilizante. Diversos experimentos têm sido conduzidos nos últimos anos para determinar as melhores condições de solo e da cultura para o seu uso.

Desta forma, os distintos sistemas de cultivo e manejos do fertilizante fosfatado contribuirão, de forma significativa, no acesso do P pela planta e por fim na produção das culturas, uma vez que o P é um importante modulador da produção.

Diante disso, este trabalho objetivou caracterizar a distribuição de P em um Latossolo Vermelho do Cerrado cultivado por 14 anos com as culturas de soja e milho recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $P_2O_5$  como superfosfato triplo e fosfato natural reativo aplicados no sulco de semeadura e a lanço sob SPC e SPD, tendo o cerrado nativo como referência. Para tal, foram utilizados três métodos de extração de P disponível no solo: Mehlich I, usado como padrão na maior parte do território brasileiro; o Bray 1, indicado para as fontes apatíticas de P; e Resina, usado como padrão em alguns estados do sul do Brasil.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fósforo e produção agrícola no Cerrado

A história da agricultura no Brasil registra que, até o início da década de 1960, o processo de produção era extensivo, praticamente sem utilização de corretivos e fertilizantes minerais e caracterizava-se, principalmente, por cultivos extrativistas nos solos férteis das regiões litorâneas (principalmente nas regiões Sul e Sudeste), que após terem suas reservas de nutrientes esgotadas, eram abandonados. Nesta época a produção agrícola no Cerrado era considerada impraticável e consistia apenas de pecuária extrativista.

Durante a década de 1960 pesquisas demonstraram a possibilidade de recuperar os solos esgotados e tornar produtivos os solos do Cerrado, mediante a correção da acidez do solo e a adubação. Nesta fase destacam-se atuações de instituições como o Instituto de Pesquisas (IRI) e a Estação Experimental Brasília bem como parcerias entre a Organização das Nações Unidas para Agricultura (FAO), Associação Nacional para Difusão de Adubos (Anda) e Associação Brasileira de Crédito e Assistência Rural (Abcar).

Durante a década de 1970 o Cerrado foi apontado como uma região estratégica para o País, que deveria ser ocupado e incorporado no sistema produtivo agrícola. Isso, principalmente pela mudança da capital federal para Brasília e pelas necessidades de aumento na produção de *commodities* agrícolas para exportação, de modo que o Cerrado apresentava vantagens como a grande disponibilidade de terras a preço baixo, clima e topografia favoráveis e presença de recursos minerais (calcário e fósforo). Assim, houve a criação de diversos programas (Programa de Desenvolvimento dos Cerrados - Polocentro, Programa Especial para a Região Geoeconômica de Brasília - Pergeb, Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para o Desenvolvimento dos Cerrados - Prodecer), parcerias (principalmente com as universidades norte-americanas de Carolina do Norte e Cornell e a Agência de Cooperação Internacional do Japão - JICA) e instituições de pesquisas como Embrapa, ressaltando a criação de uma unidade da empresa voltada exclusivamente para pesquisas nesse bioma, denominada Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados (CPAC), hoje Embrapa Cerrados.

Hoje o Cerrado apresenta-se como uma das principais regiões agrícolas do país, respondendo por 60 % da soja, 59% do café, 45% do feijão, 44 % do milho e 81 % do

sorgo produzidos no País, possuindo um total de 14 milhões de hectares cultivados com culturas anuais e 3,5 com culturas perenes dos 139 milhões de hectares cultiváveis.

O Cerrado ocupa 207 milhões de hectares (aproximadamente 24 % do território brasileiro), em área heterogênea e não contígua, perfazendo Estados do Centro-Oeste, Norte, Nordeste e Sudeste. O Cerrado apresenta grande heterogeneidade ambiental, evidenciada pela sua vegetação, que varia desde predominância de vegetação rasteira (Campos Limpos) até predominância de arbóreas (Cerradão), com diversas fases intermediárias (Campos Sujos, Cerrados), bem como pela sua altimetria, com 73 % do território variando de 300 m a 900 m de altitude. O clima do Cerrado é característico, ocorrendo duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca, bem como estiagens durante o período chuvoso, fenômeno conhecido popularmente como “veranico”. Além disso a região é provedora de águas para três das principais bacias hidrográficas do País (Bacia do rio São Francisco, Bacia dos rios Araguaia e Tocantins e Bacia dos rios Paraguai e Paraná)

As principais classes de solos encontradas no Cerrado são Latossolos (46 %), Neossolos Quartzarênicos (15,2 %) e Argissolos (15,1 %). Os Latossolos são solos muito intemperizados, profundos, bem drenados, sem grandes impedimentos à mecanização agrícola, distróficos, álicos, com pequena capacidade de retenção de água disponível, baixa capacidade de troca catiônica, teores de fósforo (P) disponíveis muito baixos e elevada capacidade de adsorção de P (Sousa et al, 2008).

Uma vez que os solos do Cerrado oferecem, em condições naturais, baixa disponibilidade de P para o favorável desenvolvimento de praticamente todas as plantas cultivadas para produção de alimentos, fibras e carne, torna-se necessária adição de fertilizantes fosfatados ao solo primeiramente, visando elevar esse nível de disponibilidade a valores aceitáveis antes do início do sistema produtivo e em seguida mantendo-o ao longo das safras agrícolas, por meio de adições periódicas que reponham, ao menos, aquilo que foi retirado por ocasião das colheitas.

No entanto, nessa região, diversos fatores interferem para que a eficiência desse processo, que constitui a construção da fertilidade do solo e sua manutenção ao longo do tempo, seja baixa. O principal deles é a elevada capacidade de retenção de P na fase sólida desses solos, devido ao elevado conteúdo de óxidos de ferro e alumínio, capazes de reter íons fosfato em formas de baixa labilidade. Nesse sentido, após a dissolução dos adubos fosfatados adicionados, a maior parte do fósforo é adsorvido à fase sólida, formando compostos de solubilidade variáveis (Sousa, 1980). Além disso, constata-se uma ineficiência morfofisiológica das plantas cultivadas (e suas associações com

microorganismos) em relação às nativas da região. Isso resulta num requerimento de grandes aportes de P na fase de correção, acima das quantidades necessárias para formação da planta, bem como de adições anuais acima da exportação das culturas (Anghinoni, 2004), visando compensar a capacidade dreno do solo que é bem maior do que a da planta (Novais et al., 2007), elevando consideravelmente o custo de produção.

A solubilização do P aplicado no solo e seu aproveitamento pela planta irão depender do tempo de reação do adubo no solo, textura do solo, tipo de minerais de argila, pH do solo, fonte, dose, granulometria e modo de aplicação do adubo, além da espécie de planta cultivada (Sousa & Lobato, 2004). Desta forma percebe-se que não existe recomendação prévia de melhor manejo da adubação fosfatada, sendo necessário avaliar cada situação do ponto de vista do solo, da planta cultivada e das condições climáticas da região, a fim de determinar de que forma a adubação fosfatada proporcionará a mais eficiente absorção pelas plantas e por consequência produtividade das culturas.

## **2.2 Absorção de P pelas plantas**

As plantas absorvem fósforo nas formas aniônicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , que são as formas de especiação iônica do fósforo de maior ocorrência nas faixas de pH usualmente encontradas nos solos, de 4,0 a 8,5 (Barber, 1984).

A capacidade de acesso pela planta ao P do solo irá depender de características de ambos (planta e solo) e estas das condições ambientais. A planta absorve o P contido na fração da solução do solo imediatamente junto à superfície radicular e este não corresponde ao total de P da solução do solo (Olsen & Kemper, 1968). Assim, a absorção pela planta torna-se altamente dependente, primeiramente, da capacidade do solo em repor o P nesta fração da solução (Barber, 1984; Corey, 1987) numa concentração e velocidade acima da mínima requerida pela planta ou microorganismos a ela associados e, em segundo lugar, da capacidade da planta ou microorganismo em promover alterações no solo que permitam essa reposição.

De maneira geral, três mecanismos atuam promovendo o contato do P do solo com a superfície radicular (Bouldin, 1961; Barber, 1962; Barber, 1984): interceptação radicular, fluxo de massa e difusão. Os dois primeiros são obtidos, respectivamente, em função da porcentagem de espaços porosos ocupados por raízes e em função da massa de água transpirada pela cultura, ambos relacionados ao teor de P na solução do solo e respondendo por cerca de 10% do total de P acumulado nas plantas (Barber, 1974).

Deste modo, a diferença entre a quantidade de P absorvido pela planta e a quantidade explicada por estes dois mecanismos corresponde à participação do mecanismo de difusão neste processo, cuja descrição conceitual é apresentada por Nye & Tinker (1977), Wild (1980), Barber (1984) e Wietholter (1985) e tendo a aplicação na estimativa de absorção de P pelas plantas se mostrado satisfatória (Olsen & Watanabe, 1963, 1970; Baldovinos & Thomas, 1967). No entanto, em condições em que os teores de P na solução do solo são altos, como nas regiões próximas aos grânulos de fertilizantes fosfatados solúveis ou na região do sulco em aplicações localizadas do P, o fluxo de massa pode se tornar importante mecanismo de contato entre o P e as raízes.

Teoricamente a quantidade de P que chega à superfície das raízes por difusão é diretamente proporcional ao coeficiente de difusão de P no solo, a área do sistema radicular, concentração de P na solução do solo. No caso de fluxo de massa, o P que chega às superfícies das raízes é proporcional à concentração de P na solução do solo e à quantidade de água absorvida pelas plantas (Barber, 1962; Nye, 1977).

Uma vez que a difusão se processa a distâncias muito curtas, em função de um gradiente de concentração, a absorção do P do solo torna-se altamente dependente da área de sistema radicular e da disponibilidade de P na região de sua influência.

Um sistema radicular bem desenvolvido é importante para utilização de forma eficiente do P aplicado ao solo. Portanto, em solos que apresentem restrição ao crescimento das raízes das plantas tanto superficial (0 a 20 cm) como subsuperficial (20 a 60 cm) como alta acidez, toxidez de alumínio e deficiência de cálcio, práticas como a calagem e em algumas situações a gessagem, são imprescindíveis.

A absorção de P da solução do solo que entra em contato com a superfície das raízes é determinada pela extensão do sistema radicular, concentração de P na superfície da raiz e capacidade das raízes em absorver P (Anghinoni, 1979). A capacidade das raízes em absorver P, que é uma característica da espécie ou variedade de planta, é determinada pela velocidade máxima de absorção ( $V_{max}$ ), concentração do íon na qual ocorre a metade da velocidade máxima ( $K_m$ ) e concentração do íon na solução quando a absorção é zero (Nye, 1977). A absorção é diretamente proporcional a  $V_{max}$  e inversamente proporcional a  $K_m$ .

O suprimento de P a apenas uma parte do sistema radicular das plantas aumenta a absorção deste nutriente nesta parte suprida devido a modificações na morfologia das raízes aumentando sua taxa de crescimento na parte suprida com P. Numa situação como esta Anghinoni (1979) observou que no milho houve redução no raio das raízes e,

conseqüentemente, aumento no volume de solo explorado por unidade de raiz. Aumentos em  $V_{max}$  e, dependendo da espécie, decréscimo em  $K_m$ , tem também sido apontados como causas da maior absorção de P na parte do sistema radicular suprida com P (Edwards & Barber, 1976; Jungk & Barber, 1974). Nas partes não supridas com P o desenvolvimento de raízes é limitado pela quantidade de P translocada internamente nas plantas a qual é pequena no caso do milho (Stryker et al., 1974).

O desenvolvimento do sistema radicular das plantas é afetado por fatores genéticos, do solo e ambientais (Kovar et al., 1992). Sistemas de manejo que promovam maior exploração do solo pelas raízes das plantas são desejáveis em função do melhor aproveitamento da água e nutrientes, maior tolerância a estresses do solo, e por conseqüência maior produção das culturas.

Embora estudos que envolvam avaliação do sistema radicular das plantas sejam limitados pelas dificuldades metodológicas (Oliveira et al., 2000; Amos & Walters, 2006) sua importância tem sido reconhecida em função os diversos trabalhos realizados nessa temática (Pedó, 1985; Klepker, 1991; Klepker & Anghinoni, 1995; Klepker, 1996). No entanto, a literatura carece de trabalhos que inter-relacionem diversas características do solo e ambiente no desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

Como o P é o nutriente que mais influencia na distribuição do sistema radicular das plantas (Mollier & Pellerin, 1999), uma vez que a distribuição de P e raízes parecem estar intimamente associadas, a distribuição do P disponível no perfil do solo tem sido objeto de estudo por décadas, principalmente pelo fato desse nutriente estar entre os de menor mobilidade no solo (Barber, 1984).

### **2.3 Distribuição do fósforo no solo e produção agrícola**

A distribuição do P no solo e por conseqüência a produção agrícola é influenciada pelo tipo de solo (Muzilli, 1983; Cowie et al., 1996), sistema de cultivo (Duiker & Beegle, 2006; Garcia et al., 2007) e manejo da adubação fosfatada (Eckert & Johnson, 1985) dentre outros fatores, sendo que todos se relacionam ampliando ou reduzindo o efeito uns dos outros ao longo do tempo. No entanto, no caso de cultivos anuais de grãos, independente do manejo adotado, o P geralmente encontra-se limitado à camada 0-20 cm de profundidade (Nunes et al., 2008), sendo que dentro desta camada o manejo passa a afetar profundamente a distribuição de P.

### 2.3.1 Sistema de cultivo

Até o final da década de 1960 a produção agrícola brasileira foi realizada sob SPC, que consistia em revolver o solo antes do plantio visando incorporar insumos e controlar ervas daninhas, sendo que o principal equipamento utilizado era a grade aradora. Esse sistema demonstrou-se insustentável, principalmente em virtude das elevadas taxas de erosão hídrica resultantes das chuvas que encontravam o solo desnudo.

No início da década de 1970, no sul do País, surgiu o SPD que se baseava na manutenção dos restos vegetais na superfície do solo promovendo o plantio “direto na palha” da cultura anterior, sem haver, portanto, o revolvimento do solo. Futuramente o conceito de plantio direto abrangeria a adoção de rotação de culturas e o uso de plantas de cobertura na entre-safra. No entanto, essas práticas são perfeitamente aplicáveis ao SPC, de modo que, em essência, a única diferença entre SPD e SPC encontra-se no não revolvimento do solo no primeiro.

No Cerrado o SPD passou a ser adotado no início da década de 1990, sendo que hoje cerca de 50% de sua área agrícola encontra-se sob este sistema (FEBRAPDP, 2009).

A literatura fornece inúmeros trabalhos apresentando os efeitos do SPD nas propriedades do solo sendo que na maioria das vezes contrastando com o SPC. Os primeiros trabalhos em região de clima temperado mostraram o efeito dos resíduos culturais no armazenamento de água no solo, no acúmulo de nutrientes na camada superficial e no acúmulo de matéria orgânica do solo, bem como da ciclagem de nutrientes no rendimento de grãos de milho (Shear & Moschler, 1969; Triplett et al., 1969; Triplett & Van Doren, 1969; Moschler et al., 1972) enquanto em região tropical Lal (1976) e Blevins et al. (1977) observaram a mesma tendência.

Em condições brasileiras, as primeiras citações sobre o efeito do preparo reduzido foram feitas em Minas Gerais, em 1961, por Vieira e Frazier (Muzilli, 1981). Posteriormente, os trabalhos pioneiros realizados na região Sul do País enfatizaram a eficiência do SPD no controle das perdas de solo por erosão (Ramos, 1976; Wunsche & Denardin, 1978; Mondardo, 1978).

De maneira geral os efeitos do SPD na fertilidade do solo são o acúmulo de bases ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$ ) na superfície do solo (Muzilli, 1981, 1983 e 1985; Sidiras & Pavan, 1985; Sá, 1993; Nunes et al., 2008), acúmulo de MOS (Sá, 2001; Calegari,

2006), aumento da CTC (Burle et al., 1997), aumento na capacidade de água disponível, sendo que parte destes efeitos não foram observados no Cerrado uma vez que existem poucos experimentos de longa duração nessa região que permitam extrair informações conclusivas sobre alterações na dinâmica da fertilidade do solo sob SPD (Lopes et al., 2004).

O aumento do teor de MOS na camada superficial do solo com o decorrer do tempo pode ser considerado um dos melhores benefícios do SPD (Lopes et al., 2004). Esse acúmulo é decorrente da manutenção do resíduo vegetal na superfície do solo e da manutenção da estrutura dos macroagregados protegendo a MOS, que atua como agente cimentante entre os microagregados, ao ataque microbiano (Sá et al., 2006), bem como da redução das perdas de MOS por erosão (Hernani et al. 1999). Como resultado observam-se melhorias para os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, influenciadas pela MOS.

Fisicamente, a presença da MOS aumenta a quantidade de agregados de maior estabilidade, melhorando a estrutura do solo e, conseqüentemente a porosidade, a aeração, a drenagem e a retenção de água. Quimicamente atua como trocador de íons (CTC), estoca nutrientes como nitrogênio (N), fósforo (P) e enxofre (S), e libera compostos orgânicos que complexam alumínio ( $Al^{3+}$ ), reduzindo sua toxidez. Sua principal função biológica é fornecer carbono como fonte de energia para os microrganismos, aumentando sua população e, conseqüentemente, a ciclagem de nutrientes.

No que se refere à dinâmica do P no solo observa-se que o SPD proporciona acúmulo de P na camada superficial do solo (Selles et al., 1997) devido às aplicações anuais que, em geral, situam-se até 10 cm de profundidade e pela manutenção dos restos culturais na superfície, que ao se decomporem liberam P nesta camada. Esse fato tem sido observado tanto pra formas de P consideradas disponíveis (Triplett e Van Doren, 1969; Hargrove, 1985; Sidiras e Pavan, 1985; Sá, 1999; Lopes et al. 2004), quanto para as diversas formas de fracionamento (Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003), sendo este efeito ampliado ao longo do tempo (Nicolodi, 2007; Costa, 2008) e em função do tipo de adubação fosfatada (Santos, 2009). No entanto, isto ocorre após algum período de implantação do sistema de modo que só pode ser mensurado em experimentos de longa duração.

Apesar da redistribuição do P do solo ocorrer (Duiker et al., 2006), a tendência observada é o acúmulo do nutriente na camada até 5 cm de profundidade no longo prazo

(Merten & Mielniczuk, 1991; Cowie et al., 1996; Bayer & Mielniczuk, 1997; Falleiro et al., 2004), sendo que abaixo desta camada a disponibilidade é bastante reduzida (Hussain et al., 1999; Essington & Howard, 2000).

O acúmulo superficial de P no SPD em relação ao SPC pode representar, para camada de 0-2,5 cm, de 2 (Rheinheimer & Anghinoni, 2001) a 10 vezes (Bayer & Bertol, 1999) maiores teores no SPD, em áreas experimentos de longa duração, sendo que valores de P disponível freqüentemente encontrados no SPD situam-se entre 4 a 7 vezes superiores em relação ao SPC na camada de 0 a 5 cm (Shear & Moschler, 1969). Esse efeito pode representar sérias limitações na absorção de P e água pelas plantas em períodos de estiagem (Klepker, 1996) quando a camada superficial do solo torna-se seca, e apesar de haver raízes e P, não há absorção.

A redistribuição do P, no SPD, para camadas mais profundas do solo, ocorre por fenômenos físicos, pela movimentação promovida pela abertura do sulco de plantio, ou biológicos, sendo as raízes das plantas, microorganismos e fauna do solo os principais agentes. Esses efeitos são lentos e cumulativos.

Durante seu crescimento, as raízes são forte dreno de P, que é translocado da região de absorção para as raízes em crescimento em regiões de baixa disponibilidade na subsuperfície, de modo que após a morte da planta o P é liberado nesta camada pela mineralização das raízes (Gregory, 2006), sendo este efeito tão mais pronunciado quanto mais agressivo for o sistema radicular da planta em questão (De Maria & Castro, 1993), fato que demonstra a importância do estabelecimento de rotações de cultura. O mesmo fenômeno pode ser observado com microorganismos. Estes, além disso, podem apresentar capacidade de assimilação de P inorgânico superior à das plantas, como ocorre com fungos micorrízicos, incorporando o P em formas orgânicas que, posteriormente, poderão estar disponíveis às plantas pela mineralização.

O SPC proporciona uma maior homogeneidade do P na camada sob influencia do equipamento de preparo, sendo esse efeito observado para as diversas formas de P (Rheinheimer & Anghinoni, 2001, 2003), obtido com apenas um único preparo (Eltz et al., 1989) e capaz de proporcionar um crescimento radicular mais profundo nesse sistema (Hughes et al., 2002). Por outro lado, o SPC promove uma exposição do P a novos sítios de adsorção (Sousa e Volkweiss, 1987), reduzindo sua labilidade no sistema, principalmente em solos com elevado efeito dreno (Novais et al., 2007).

Este efeito, associado com os elevados requerimentos de P na fase de correção, acima das quantidades necessárias para formação da planta, bem como de adições



anuais acima da exportação das culturas (Anghinoni, 2004), visando compensar a capacidade dreno do solo que é bem maior do que a da planta (Novais et al., 2007) tem levado a conclusão de que a eficiência da adubação fosfatada é baixa em solos do Cerrado e de que esses solos seriam um dreno constante com efeito que somente cessaria quando a capacidade de adsorção do mesmo fosse preenchida.

Essa informação, se verdadeira, se limitaria ao SPC, onde toda base teórica sobre o assunto foi desenvolvida. Nesse sistema, a cada novo revolvimento formas lábeis de P são expostas a novos sítios de adsorção (Sousa e Volkweiss, 1987), no entanto no SPD uma nova dinâmica química, física e biológica se estabelece (Vezzani, 2001; Nicolodi, 2007) permitindo obtenção de maiores produtividades (Santos et al., 2003), melhor aproveitamento do P (Coelho & Alves, 2004) bem como menor demanda de fertilizantes fosfatados (Resende, 2004) ao longo dos anos, em relação ao SPC.

### **2.3.2 Modos de aplicação do fertilizante fosfatado**

Para que ocorra adequada absorção de P, crescimento e produtividade das culturas e por fim elevada eficiência dos fertilizantes fosfatados, estes devem ser aplicados de maneira adequada no solo, permitindo sua melhor localização em relação às raízes das plantas. Os modos de aplicação mais utilizados são a lanço, na superfície, com ou sem incorporação, no sulco de plantio, em cova e em faixas (Sousa et al., 2004).

O efeito do modo de aplicação do adubo na distribuição do P, absorção pelas plantas e por conseqüência nas respostas em rendimento das culturas depende de diversos fatores como clima, tipo de solo, nível de fertilidade do solo, sistema de cultivo adotado, dose de fertilizante a ser aplicada, fonte do fertilizante, espécie a ser cultivada, espaçamento de plantio e distribuição do sistema radicular das culturas, sendo que esses fatores interagem entre si (Anghinoni, 2004; Pavinato e Ceretta, 2004).

A eficiência relativa da aplicação do fertilizante fosfatado também se encontra relacionada ao teor de P inicial no solo. Welch et al. (1966) e Costa (2008) trabalhando com modo de aplicação de P na cultura do milho concluem que quanto mais deficiente em P é o solo, maior o rendimento de grãos de milho com o P aplicado de forma localizada. No entanto, com o aumento do teor de P no solo, esse efeito deixa de existir. Em doses próximas ao limite de resposta da cultura, a adubação a lanço torna-se preferencial.

Em condições de baixa fertilidade há resposta diferenciada aos modos de aplicação do fertilizante, sendo que doses baixas têm a resposta favorecida pelo menor contato com o solo, como ocorre na aplicação no sulco de semeadura, principalmente no caso de fontes solúveis (Fox & Kang, 1978; Anghinoni & Barber, 1980). No caso de fosfatos de menor solubilidade as respostas são favorecidas pelo maior contato com o solo, como ocorre nas aplicações a lanço na superfície. De maneira geral ausência de resposta ao modo de aplicação é verificada em solos com elevados teores de P (Randall & Hoelf, 1988; Hargrove, 1985).

Pavinato & Ceretta (2004) avaliando efeito de modo e época de adubação com P na sucessão de trigo plantado no inverno e milho no verão em Latossolo Vermelho argiloso do Rio Grande do Sul apresentando teores de P muito altos, observaram produtividades semelhantes para adubações a lanço ou no sulco.

Sousa & Lobato (2004), em Latossolo Vermelho argiloso em Planaltina – DF, não observaram diferença de produção acumulada em oito cultivos de soja adubada anualmente com SFT na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicada no sulco ou a lanço na superfície sob SPC, (19,9 t ha<sup>-1</sup> e 21,2 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente) sendo que a produção acumulada do tratamento testemunha sem P foi de 1,8 t ha<sup>-1</sup>, demonstrando se tratar de área de baixa fertilidade. Nessa mesma área, em tratamentos sob SPD, a adubação com SFT aplicado a lanço proporcionou menores produções nos três primeiros anos e maiores produções nos cinco anos seguintes, de modo que ao final dos oito anos a produção total foi semelhante, quando comparado com aplicação no sulco de plantio. Para o FNR sob SPD a produção acumulada foi bem menor do que no preparo convencional independente do modo de aplicação. Além disso, no SPC o FNR aplicado no sulco proporcionou menor produção acumulada nos oito anos em relação à aplicação a lanço, sendo este efeito resultado dos quatro primeiros anos. Por outro lado, estes mesmos autores relataram em área de alta fertilidade produções semelhantes de soja no primeiro cultivo e milho no segundo cultivo, adubados com 50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> aplicado no sulco ou a lanço, na forma de SFT.

O sistema de cultivo adotado influencia nas respostas das plantas ao modo de aplicação do fertilizante. Model e Anghinoni (1992) avaliaram o efeito da aplicação de P a lanço e no sulco na produção de milho cultivado sob SPC e SPD e demonstraram não haver diferenças estatísticas no rendimento do milho para os diferentes modos de aplicação. No entanto, observaram que para os dois modos de aplicação o rendimento de grãos de milho foi estatisticamente superior no SPD em relação ao SPC. Para a

aplicação a lanço, o rendimento de milho no SPD foi 1,10 t ha<sup>-1</sup> (18 %) maior, do que aquele observado no SPC, sendo que para aplicação no sulco, essa diferença se reduziu a metade, mas ainda manteve o SPD com maiores produtividades.

Por outro lado Howard et al. (2002) avaliando a resposta do milho a doses e modos de aplicação P em SPC e SPD durante 11 anos de cultivo, observaram que as produções foram maiores no SPC que no SPD em 5 anos de cultivo. No entanto, também observaram que apesar das menores produções no SPD, este apresentou maiores taxas de conversão do P aplicado em produção, uma vez que adubação com 20 kg ha<sup>-1</sup> de P provocou aumento de 620 kg ha<sup>-1</sup> de grãos em relação a parcela testemunha no SPD, enquanto no SPC a adubação com 39 kg ha<sup>-1</sup> de P provocou aumento de apenas 440 kg ha<sup>-1</sup> de grãos.

A escolha do melhor modo de aplicação também dependerá da dose a ser aplicada. Sousa e Lobato (2002), em suas recomendações para o Cerrado, afirmaram que a aplicação de fertilizantes fosfatados a lanço deve ser utilizada para doses superiores a 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. No caso de doses inferiores a estas serem aplicadas em culturas anuais, recomenda-se à localização em sulcos, o que possibilitará melhor uso do P do fertilizante solúvel em água pelas plantas.

Anghinoni (1992), avaliando os efeitos da aplicação de diferentes doses de SFT (0 a 320 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) em diversas frações de solo (6,25% a 100% do volume da camada arável) sobre o crescimento e produção de milho, verificou que a escolha da melhor fração de solo fertilizada dependerá da dose aplicada. Para pequenas doses de SFT (40 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), a maior eficiência no aproveitamento do P pelo milho ocorreu quando da mistura do fertilizante com pequenas frações de solo (até 25%). À medida que as doses aumentaram, aplicações que submetiam o P a um maior contato com o solo também passaram a ser mais eficientes, chegando a uma dose (acima de 160 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) na qual a forma de localização do fertilizante passou a não ser importante. Sendo assim, de maneira geral, ausência de resposta ao modo de aplicação é verificada quando são utilizadas elevadas doses de adubação (Anghinoni & Barber, 1980).

Yost et al. (1979), realizando estudo de campo com milho em Latossolo vermelho escuro argiloso com teor inicial de P muito baixo (< 1 mg dm<sup>-3</sup>), observaram que, no primeiro cultivo, aplicações de 160 e 320 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a lanço resultaram em uma maior produção de milho do que aplicações no sulco, sendo que para a dose de 160 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> um tratamento consistindo de aplicação de metade da dose (80 kg ha<sup>-1</sup>

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a lanço e outra metade no sulco proporcionou rendimento intermediário à dose total a lanço ou no sulco.

A maior parte das informações relatadas até o presente momento foram obtidos utilizando fontes de P solúveis como os superfosfatos. No que se refere aos fosfatos insolúveis em água, como os FNR, os trabalhos são mais escassos. Mesmo assim a recomendação que se tem é a de que a aplicação ideal seria à lanço, incorporando-os ao solo, pois isso aceleraria seu processo de solubilização (Sousa e Lobato, 2004).

Lawton et al. (1956), num estudo em casa de vegetação, observaram que, para fontes de P com menos de 40 % do P total solúvel em água, a maior absorção de P do fertilizante, em pó, foi obtida quando aplicado na superfície e incorporado ao solo em relação à aplicação localizada próximo à semente. Já com fertilizantes de alta solubilidade em água, a absorção de P foi maior quando aplicado localizado próximo à semente. No entanto, o mesmo resultado não foi obtido por Webb e Pesek (1959) que não observaram interação entre o modo de aplicação do fertilizante e sua solubilidade em água (doses entre 22,5 kg ha<sup>-1</sup> e 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) na eficiência do fertilizante para o crescimento do milho em solos ácidos, pobres em P disponível.

Outro aspecto importante quanto ao modo de aplicação de P é que os efeitos da localização são ampliados em cultivos de elevado espaçamento pelo aumento da relação fertilizante/solo adubado, de modo que em espaçamentos menores as respostas são semelhantes à adubação a lanço. Para uma mesma dose de adubo aplicada no sulco de semeadura, quanto menor o espaçamento entre linhas, maior seria o volume de solo fertilizado, e vice-versa.

A distribuição das raízes das plantas cultivadas pode determinar de que formas elas responderão à aplicação de P. A adubação localizada no sulco de plantio favorece uma elevada concentração de P numa região limitada de solo (Selles et al., 1997), ou seja, níveis elevados de disponibilidade numa área pequena, limitando a proporção de raízes capazes de absorver o nutriente (Resende, 2004) o que poderá afetar negativamente os rendimentos em plantas com sistema radicular pouco plástico, principalmente em cultivos com elevado espaçamento. Por outro lado a adubação em área total permite maior contato da raiz com o P (Resende, 2004; Klepker & Anghinoni, 1993). No entanto, trabalhos têm mostrado que independentemente do manejo da adubação fosfatada existe uma elevada concentração de raízes de culturas anuais na camada até 10 cm (Klepker & Anghinoni, 1993; Anghinoni & Meurer, 1999), o que

pode ser prejudicial em situações de déficit hídrico (Kochhann et al., 1999; Klepker, 1996).

A partir do exposto, nota-se a dificuldade de recomendar o melhor modo de aplicação de adubos fosfatados, uma vez que diversos fatores atuam interagindo entre si, de modo que a cada nova situação uma determinada forma passa a ser favorável ou não.

Cabe ressaltar que, uma vez que o SPD é visto como um sistema em mudança, com propriedades emergentes em função do tempo (Nicolodi, 2007), o melhor modo de aplicação de P nesse sistema pode variar em função do tempo de adoção.

### **2.3.3 Fonte do fertilizante fosfatado**

As rochas fosfáticas representam 99% da matéria prima dos fertilizantes fosfatados produzidos no mundo e constituem, principalmente de dois grupos de minerais: as apatitas - fosfatos de cálcio com hidroxila (OH), flúor (F) e cloro (Cl) - e as fosforitas - fosfatos de cálcio com substituição parcial do fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) por carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), e do cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) por magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e sódio ( $\text{Na}^+$ ).

Os fertilizantes fosfatados podem ser classificados quanto à solubilidade em água, citrato neutro de amônio (CNA) e ácido cítrico (AC), analisados de acordo com a legislação brasileira. Nesse sentido, Sousa et. al (2004) definem 5 classes de fertilizantes fosfatados:

- 1) Fertilizantes com alta solubilidade em água e em CNA - os principais são o superfosfato simples (SFS), o superfosfato triplo (SFT) e os fosfatos monoamônico (MAP) e diamônico (DAP). Possuem reconhecida eficiência agrônômica e correspondem a mais de 90% do  $\text{P}_2\text{O}_5$  utilizado na agricultura (Moreira et al., 1997; LANA et al., 2004). Além disso, o SFT é amplamente utilizado como fonte padrão de P em experimentos que avaliam a eficiência agrônômica relativa de fontes de P (Bolan et al. 1990).
- 2) Fertilizantes insolúveis em água e em AC - correspondem aos fosfatos naturais brasileiros (Araxá, Patos de Minas, Catalão e outros). Possuem lenta dissolução no solo e conseqüentemente muito baixa eficiência agrônômica.
- 3) Fertilizantes com média solubilidade em água e em CNA - correspondem aos fosfatos parcialmente acidulados com ácido sulfúrico a partir de concentrados fosfáticos nacionais. A eficiência agrônômica destes

fertilizantes é proporcional a fração solúvel presente neles (Sousa et. al (2004).

- 4) Fertilizantes insolúveis em água e com alta solubilidade em CNA e AC - correspondem aos termofosfatos e produtos à base de fosfato bicálcico. Apresentam eficiência agronômica equivalente aos fertilizantes solúveis em água quando utilizado na forma moída, tendo a eficiência no ano da aplicação reduzida com a granulação.
- 5) Fertilizantes insolúveis em água e com média solubilidade em AC – correspondem aos fosfatos naturais sedimentares de alta reatividade como os de Carolina do Norte, Gafsa, Marrocos e outros. Apresentam eficiência agronômica equivalente aos fertilizantes solúveis em água quando utilizado na forma moída. Quando não moídos apresentam menor eficiência inicial (no ano da aplicação) e efeito residual semelhante ou superior aos fertilizantes solúveis (Sousa et al. 1999a).

A escolha da fonte de P a ser utilizada normalmente depende de sua eficiência agronômica (capacidade de suprir as plantas em relação à fonte solúvel em água) e do custo por unidade de  $P_2O_5$ , considerando-se o transporte, o manuseio e o armazenamento (Prochnow et al., 2003).

A eficiência agronômica dos fertilizantes é influenciada pela solubilidade da fonte empregada, por sua granulometria, por propriedades do solo como pH, teores de Ca e P, capacidade de retenção do P, teor de matéria orgânica e CTC, pelas práticas de manejo como sistema de cultivo e modo de aplicação, que determinam a grandeza do contato do fertilizante com o solo, influenciando, conseqüentemente, na taxa de reação entre eles e pela espécie empregada (anual, perene ou pastagem).

Apesar de ser relatado que os fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água são mais eficientes no curto prazo (Bolland & Bowden, 1982), é também bastante conhecido que essas fontes, quando adicionadas aos solos tropicais ácidos, de alta capacidade de fixação de P, são rapidamente convertidas a formas indisponíveis às plantas, podendo ter sua eficiência diminuída ao longo do tempo (Bolland, 1985; Kordörfer et al., 1999; Ghosal et al., 2003; Prochnow et al., 2003).

A aplicação direta de rochas fosfáticas no solo como fonte de P é uma prática que tem crescido ao longo dos anos sendo que diversos experimentos têm sido conduzidos nos últimos anos para determinar as melhores condições de solo e da cultura

para o seu uso (Khasawneh & Doll, 1978; Zapata & Zaharah, 2002; Casanova et al., 2002).

A baixa reatividade de fosfatos naturais brasileiros faz com que tenham eficiência agronômica muito baixa para culturas anuais em relação aos fosfatos solúveis em água, nos primeiros anos após a aplicação, sendo que para pastagens, espécies perenes, a eficiência é baixa no primeiro ano, evoluindo nos anos subsequentes. Goedert & Lobato (1984) observaram o índice de eficiência agronômica (IEA) de fontes de P em um Latossolo argiloso cultivado com culturas anuais por cinco anos seguidas de capim *Andropogon* por três anos, na dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, aplicada antes do primeiro cultivo, tendo como referência o SFT. Enquanto as culturas anuais apresentaram IEA de no máximo 45 % após 5 anos o uso do capim por três anos elevou os valores de IEA para até 86%.

Segundo Goedert et al. (1991) a menor exigência em P da pastagem estabelecida, maior espaço de tempo favorecendo a solubilização destes materiais no solo e a acidificação do solo decorrente de processos naturais bem como de elevadas aplicações de nitrogênio amoniacal proporcionam os maiores IEA observados nesses sistemas quando do uso de fontes naturais de P. No entanto, esses autores relatam a necessidade de utilizar maior quantidade de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total para compensar a baixa reatividade dessas fontes, dependendo também do sistema de produção utilizado.

Uma vez que os fosfatos naturais brasileiros, possuem baixa eficiência agronômica, Goedert et al. (1986) definiram que sua aplicação *in natura* somente seria recomendável em condições específicas, como em aplicações a lanço, de forma moída e misturada ao maior volume possível de solo, favorecendo o máximo contato com as partículas do solo, em utilização preferencial para pastagens e culturas perenes e em solos com maior acidez, desde que o calcário fosse aplicado para suprir o cálcio e o magnésio.

Semelhantemente, Savant & Chien (1990) comentaram que para obter maior eficiência de uso pelas culturas, a rocha fosfática deve ser aplicada a lanço em área total e incorporada ao solo para maximizar seu contato com o solo.

As fontes naturais de P conhecidas como FNR constituem de fosfatos de origem sedimentar, com geologia complexa e variada, podendo ser detríticos, precipitados químicos ou conter quantidades significativas de apatita fóssil (orgânica). Os minerais predominantes são apatitas com alto grau de substituições isomórficas de fosfato (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>) por carbonato (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) identificados muitas vezes como francolitas e fosforitas

(Kliemann & Lima, 2001). São encontradas principalmente em áreas desérticas ou de clima seco.

A legislação brasileira determina, para FNR, o teor mínimo de  $P_2O_5$  total de 27%, 28% de Ca e 30% do  $P_2O_5$  total solúvel em ácido cítrico a 2% (BRASIL, 2004).

Korndörfer et al. (1999) avaliaram a eficiência agronômica de FNR de Arad, Marrocos e Gafsa quanto à produção de grãos de milho comparados ao superfosfato triplo obtendo, respectivamente, valores de 60%, 80% e 97% de eficiência e sugerindo que com o passar do tempo os FNRs melhorariam ainda mais sua eficiência em relação à fonte de alta solubilidade, devido ao maior efeito residual.

Esse efeito foi observado por Sousa et al. (2008), que ao compararem diversos FNR com o ST, num estudo de campo, em SPC por seis anos com a cultura da soja, concluíram que em meio prazo (mais de 3 anos de cultivos sucessivos), o efeito residual dos FNR de menor solubilidade foi equivalente ou mesmo um pouco superior em relação ao ST e aos FNR mais solúveis.

Sousa et al. (1999b), avaliando o IEA do FNR de Gafsa, em diferentes doses, aplicadas a lanco por ocasião do primeiro cultivo em um Latossolo argiloso do Cerrado cultivado por quatro anos com soja sob SPC e tendo o SFT como referência, encontraram uma IEA de 59% no primeiro ano. Nos três cultivos seguintes, devido o efeito residual superior do FNR, os IEAs ultrapassaram 100%, de modo que considerando os rendimentos totais de grãos, as duas fontes apresentaram resultados semelhantes.

Para que a dissolução dos fosfatos insolúveis em água ocorra, é necessário o suprimento de acidez, contida no próprio solo, no caso de solos mais ácidos, ou pelo fornecido pela própria planta e microorganismos rizosféricos (Novais et al., 2007). Em solos da região do Cerrado, valores de pH em água até 6, ou seja, saturação por bases do solo de até 50%, não comprometem significativamente a eficiência dos FNR (Sousa et al., 1999a). Além disso, Chien & Menon (1995) observaram que o principal fator influenciador da dissolução de um fosfato insolúvel em água foi a complexação do cálcio proveniente da rocha fosfática pelos ácidos orgânicos secretados por espécies de *Rhizobium* e *Bradyrhizobium*, usadas na inoculação de sementes de leguminosas, enquanto o pH teve menor importância.

Outro fator que afeta a dissolução dos FNR é o teor de Ca e P na solução próxima ao fertilizante. Novais et al. (2007) comentaram que a diminuição dos teores desses produtos da dissolução quebraria o equilíbrio e aumentaria a taxa de dissolução.



Esta retirada do Ca e do P da região próxima às partículas do FNR pode ocorrer de diversas formas: absorção de Ca e P pelas raízes de plantas, lixiviação de Ca, dreno do solo, diretamente proporcional aos teores de matéria orgânica e CTC, como ocorre em SPD.

Estudos de campo e observações de laboratório mostram que solo com baixo pH, teores baixos de P e Ca trocáveis na solução, alta capacidade de fixação de P, elevado conteúdo de água do solo, culturas com extenso sistema radicular e longos períodos de crescimento favorecem a obtenção de elevada eficiência agrônômica dos fosfatos naturais, por contribuir à sua dissolução (Hammond et al., 1986; Apthorp et al., 1987; Kanabo & Gilkes, 1987).

Em relação ao tamanho das partículas dos fosfatos naturais, é citado na literatura que a eficiência agrônômica dessas fontes aumenta com a redução do tamanho das partículas. Horowitz e Meurer (2003), avaliando a eficiência de dois FNR (Gafsa e Gantour Black) farelados em função do tamanho de partícula, notaram que essas fontes apresentaram maior índice de eficiência agrônômica quando foram moídos finamente (partículas < 0,074 mm), e que à medida que o tamanho das partículas foi aumentado, a eficiência foi reduzida.

Maiores informações sobre fontes de P podem ser encontradas em revisão literária feita por Benedito (2007).

## **2.4 Avaliação da disponibilidade de P no solo**

Numa visão estática, disponibilidade do fósforo do solo às plantas corresponde ao somatório do fósforo da solução do solo e aquele contido na fase sólida que é capaz de repor rapidamente a solução, sendo um conceito limitado uma vez que desconsidera características do solo e da planta, inferindo que a resposta das plantas é semelhante e unicamente dependente deste equilíbrio.

Este conceito somente evoluiu com os conhecimentos mais aprofundados das relações solo-planta, por efeito do entendimento dos mecanismos de acesso das raízes aos nutrientes do solo (Bouldin, 1961; Barber, 1962), conferindo um caráter dinâmico ao conceito de disponibilidade já que agora ele passa a ser uma função da capacidade de suprimento de nutrientes à superfície radicular (Barber, 1984). Desta forma, avaliar a disponibilidade de P no solo consiste em quantificar os teores de P capazes de suprir as raízes das plantas, informação importante no sentido de qualificar o potencial produtivo

do solo em questão, e dar base para possíveis correções de acordo com o potencial que se deseje alcançar.

Diversas metodologias foram desenvolvidas nas décadas de 1940 e 1950 buscando determinar o P disponível dos solos. Estas metodologias se baseiam na indução de um equilíbrio do P da fase sólida do solo com uma solução adicionada a este, denominada solução extratora, uma vez que o P contido nesta fase (adsorvido ou precipitado) seria extraído pela ação de algum íon presente na solução, que de acordo com Thomas & Peaslee (1973) podem ser: a) íons hidrogênio, que apresentam rápida capacidade de solubilizar Ca-P, incluindo formas precipitadas ou básicas como as apatitas, além de Al-P e Fe-P, mas menores quantidades; b) íons hidróxidos, capazes de solubilizar formas precipitadas de Fe-P, Al-P e Ca-P, respectivamente em ordem decrescente de taxa de solubilização, promover deslocamento de P adsorvido destas mesmas formas, precipitando o cátion correspondente, além de solubilizar formas orgânicas, quando em alta atividade iônica; c) íons fluoreto, capazes de complexar fortemente o Al liberando P, além de precipitar o Ca de formas mais solúveis de Ca-P (como fosfato dicálcico), liberando o P; d) íons bicarbonato, atuando em formas Ca-P por diminuir a atividade de Ca ao precipitá-lo como  $\text{CaCO}_3$ , além de remover P de formas Al-P por precipitação do Al e deslocamento do P pela ação da hidroxila; e) íons orgânicos complexantes, como acetato e lactato, capazes de formar complexos fracos com cátions polivalentes, sendo mais utilizado para evitar readsorção de P extraído por outros íons como o hidrogênio; f) íons sulfato, capazes de competir, de maneira bem limitada, com o P pelos sítios de adsorção de Al e Fe, tendo ação semelhante aos íons acetato.

A maior parte das soluções extratoras apresentam atuação de dois ou mais desses íons, podendo ser divididos em quatro grupos de extratores (Kamprath & Watson, 1980; Kuo, 1996): a) ácidos fracos diluídos, tendo como exemplo o extrator Egner (lactato de cálcio 0,02N + HCl 0,02N); b) ácidos fortes diluídos, como por exemplo o extrator Mehlich-I ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025N + HCl 0,05N); c) ácido forte diluído + íon complexante, como o extrator Bray-1 (HCl 0,025N +  $\text{NH}_4\text{F}$  0,03N); d) soluções alcalinas tamponadas, como por exemplo o extrator Olsen ( $\text{NaHCO}_3$  0,5N a pH 8,5).

Estes métodos, por seu caráter dissolutivo, apresentam-se dependentes dos compostos de P precipitados ou adsorvidos na fase sólida, e isto representa a principal limitação para o seu uso generalizado, já que o conteúdo desses compostos varia em função dos solos (Kamprath & Watson, 1980) e do tipo de adubação. Assim, cada tipo

de extrator irá apresentar limitações à eficiência da predição da disponibilidade, avaliada pela correlação entre o teor extraível pelo extrator e parâmetros da planta.

Um extrator ácido forte diluído (Mehlich-I) tem sua eficiência de predição do P disponível reduzida em função da presença de formas de Ca-P, principalmente de baixa solubilidade, como as apatitas, uma vez que apesar de não estarem disponíveis ao uso da planta, são extraídas pela solução (Goedert et al, 1990). Além disso, por dissolver parcialmente formas Fe-P e Al-P presentes nos óxidos dos solos, apresenta eficiência reduzida com incremento dos teores destes compostos, em função do processo de readsorção pelos minerais do solo ou precipitação do P extraído. A neutralização da acidez do extrator em solos alcalinos ou recém calcareados também é outra limitação (Kamprath & Watson, 1980).

Os extratores de ácido forte diluído com adição de complexante (Bray-1), por apresentarem atividade de hidrogênio inferior aos do exemplo anterior são considerados métodos capazes de extrair apenas P facilmente solúvel em meio ácido, nas formas de Ca-P, Al-P e Fe-P, não apresentando a mesma limitação do anterior de extrair formas de Ca-P de elevada estabilidade. Além disso, os íons fluoreto reduzem o efeito da readsorção pela complexação de Al. Por outro lado, esses mesmos íons são responsáveis por uma tendência de menor capacidade extração do método, já que solução de mesma força iônica, mas sem fluoreto, extraem mais P (Smith et al, 1957). Outra limitação do extrator consiste na sua neutralização na presença de calcário além da readsorção de P por precipitados de  $\text{Ca}_2\text{F}$  neo-formados.

A correlação entre P absorvido pela planta e P extraído é o principal parâmetro usado para avaliar a eficiência de um extrator na predição da disponibilidade de P para as plantas e tem sido empregada por vários autores (Raij, 1978; Galrao & Volkweiss, 1981; Anghinoni & Volkweiss, 1984), que em geral observam alta eficiência quando avaliada em solos de características semelhantes, porém redução na eficiência quando solos diferentes são avaliados conjuntamente. Para o extrator Mehlich-I, Anghinoni & Volkweiss (1984) observaram, em resultados de onze trabalhos no Brasil, uma correlação (r) média de 0,52, com variações de 0,10 a 0,94, mostrando as sérias limitações de tal método. Galrao & Volkweiss (1981) observaram a mesma tendência analisando 11 solos do Rio Grande do Sul com argila e matéria orgânica variando, respectivamente, de 16% a 70% e 0,2 a 7,8%. Para esses autores, quando analisados em cada solo a correlação entre P extraído por Mehlich-I, Bray-1, Olsen e P-solução e o P absorvido por plantas de trigo não foi menor de que 0,9. No entanto, agrupando todos os

solos este valor caiu para valores abaixo de 0,80 e chegando a 0,66 para o método de P-solução. Outra observação feita por esses autores foi que quanto menores os níveis de P no solo menores correlações entre o P extraído e o P absorvido pela planta, mostrando que em solos com manejo de baixa tecnologia esses extratores são ineficientes em estimar a disponibilidade de P as plantas.

Várias tentativas têm sido empregadas com relativo sucesso no sentido de diminuir as limitações dos extratores em estimar a disponibilidade de P do solo às plantas, consistindo, a maioria delas, em associar os valores de P extraído pelos métodos a características do solo que interferem na dinâmica de suprimento de P as plantas, como poder tampão de P (Ozzane & Shaw, 1968; Miranda & Volkweiss, 1981; Lins et al., 1989), teor de argila (Sousa et al., 1987; Lins et al., 1989) e capacidade de retenção de água.

Largamente adotada (Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, 2004; Sousa et al., 2004) a interpretação dos valores de P extraível pelos métodos em função do teor de argila contorna efeitos de readsorção do P extraído. No entanto, não é livre de limitações uma vez que apenas considera a quantidade de argila, o que pode ser problemático em solos intemperizados com alta capacidade de retenção de P em função da mineralogia da fração argila. Este efeito foi mostrado por Lins et al. (1989) em solos do Cerrado, onde solos com mesmo teor de argila, porém gibsíticos, tiveram interpretação diferente daqueles cauliniticos. Outra opção é o uso da resina trocadora de íons, que por manter o P extraído adsorvido apresenta menor interferência de poder tampão e teor de argila do solo (Rein, 1991). No entanto, a metodologia da resina, apesar de não ser dissolutiva, ainda baseia-se apenas em um dos parâmetros do solo que se correlacionam com o fluxo de P até as raízes e sua absorção, ou seja, o fator quantidade.

Uma tentativa de reduzir o efeito dissolutivo dos extratores das metodologias usuais de avaliação da disponibilidade de P surgiu com Amer et al. (1955) que propuseram a metodologia de extração por resina de troca aniônica posteriormente modificada e ampliada por Raij et al. (1986) conferindo praticidade e incorporando outros elementos, inclusive cátions. Por outro lado foi desenvolvido (Zee et al., 1987; Menon et al., 1989,1990) o método do papel filtro impregnado com oxido de ferro, baseado no mesmo principio de troca iônica com adsorção do P da solução do solo, porém mais eficiente que a resina pelo fato da adsorção ser especifica para P enquanto a adsorção da resina é eletrostática. Em ambos os métodos o P é retirado gradualmente da

solução do solo, sendo adsorvido pelo material extrator e gerando um gradiente de concentração entre a fase sólida do solo e a solução do solo.

Teoricamente, a utilização da Resina trocadora de íons na determinação de P extraível de um solo corrige ou minimiza os problemas de subestimar ou superestimar o disponível (Novais et al., 2007, Sousa et al., 1999a), além de conferir uma visão mais realística do que ocorre no sistema solo-planta (Lins, 1987).

A literatura aponta as vantagens do método da resina devido sua fundamentação teórica, na qual o processo de adsorção de P pela resina seria muito similar ao processo de absorção de P do solo pela planta, de modo que a resina teria uma função semelhante à da raiz de uma planta que, ao absorver o P da solução, baixa ai sua concentração, rompendo o equilíbrio existente entre o P da solução e o P da fase sólida do solo, promovendo a dissolução ou a dessorção de fosfato da fase sólida, de acordo com a capacidade tampão do solo. Ao mesmo tempo hidroxilas, silicatos ou algum outro ânion específico disponível na solução passam a ocupar os sítios de adsorção de P do solo. Assim, o dreno na análise do solo é a resina da mesma forma como o dreno de P no solo é a raiz e em nenhum momento da transferência de P do solo para a resina são usados reagentes químicos de modo que esta ocorre através da água destilada (Raij, 2004; Lins, 1987).

Silva & Raij (1999), revisando 72 trabalhos internacionais, observaram que o método da resina foi superior a Olsen, Mehlich 1 e Bray 1, pois foi o que apresentou valores de coeficientes de determinação, para a correlação entre índices biológicos e P no solo, consistentemente superiores aos dos demais métodos na maior parte dos trabalhos revisados, além de ser o que mais se adaptava a diferentes tipos de reação dos solos.

A comparação da fundamentação teórica da extração por resina, Mehlich I ou Bray 1 se limita a uma análise puramente química do processo de absorção de P pelas plantas, em contraste com os componentes biológicos e físico-químicos envolvidos. Percebe-se que o método da resina, como todos os outros, apresenta limitações. De fato a pulverização do solo durante a agitação com bolas de vidro seguido por 16 horas de agitação promove condições totalmente diversas daquelas que as raízes participam no solo. Um exemplo de limitação para o uso da resina é a superestimação provocada durante a extração de P em áreas recentemente adubadas com FNR (Sousa & Rein, 2009).

No Brasil, o extrator Mehlich I, de dissolução acida, é utilizado praticamente em todos os laboratórios de rotina do país, e tem como grande vantagem a extrema simplicidade de extração. Nos laboratórios do Estado de São Paulo, o método utilizado é o da resina trocadora de íons, que, apesar de aparentar mais eficiente na predição da disponibilidade de P no solo (Silva e Raij, 1999) é considerado pouco adequado para análise de rotina, principalmente pelo longo período de agitação do solo com resina em suspensão aquosa, em geral de 16 horas, e pela etapa laboriosa de separação da resina do solo após a agitação (Galvão, 1976; Silva e Raij, 1999).

Uma vez que a maioria das metodologias de avaliação da disponibilidade de P dos solos foram desenvolvidas antes do conhecimento da dinâmica de suprimento de P às raízes (Bouldin, 1961; Barber, 1962; Barber, 1984), elas se baseiam apenas no fator quantidade ou intensidade do conceito de disponibilidade, sem informar sobre o fator capacidade (Novais & Smyth 1999). Portanto, tornou-se necessário desenvolvimento de técnicas que contemplem os fenômenos envolvidos no processo de absorção de P pela planta, como por exemplo, a avaliação da disponibilidade de P a partir da estimativa do seu fluxo difusivo no solo. Neste sentido foram desenvolvidos métodos diretos de estimativa do fluxo difusivo de P com uso de papel-resina aniônica (Vaydianathan & Nye, 1966), mistura de resinas catiônica e aniônica (Masse et al., 1977), papel-óxido de ferro (Volkweiss & Corey, 1988), como superfície de troca, sendo que onde se usa resina existe a limitação da não especificidade para P da reação de troca, podendo haver competição por nitratos e sulfatos, fato que não ocorre quando se utiliza papel filtro impregnado com óxidos de ferro.

De modo geral a avaliação da disponibilidade de P a partir da estimativa do seu fluxo difuso tem apresentado superiores correlações com parâmetros da planta, e por isso eficiência de predição de disponibilidade, do que aquelas obtidas com extratores padrões como Mehlich-I (Tedesco et al., 1985; Volkweiss & Corey, 1988) e resina (Raij et al., 1987; Volkweiss & Corey, 1988; Rein, 1991), além de apresentar maior confiabilidade (avaliada pelo coeficiente de variação e amplitude de dados) para vários solos no estabelecimento de níveis críticos em função da produção relativa (Rein, 1991).

### **3 OBJETIVOS E HIPÓTESES**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar a distribuição do fósforo extraível de um Latossolo do Cerrado cultivado com soja e milho por 14 anos sob sistema de preparo convencional e sistema plantio direto em diferentes manejos da adubação fosfatada.

#### **3.2 Objetivos específicos**

1. Comparar o efeito de duas fontes de fósforo (superfosfato triplo x fosfato natural reativo) na distribuição do fósforo extraível até 50 cm de profundidade.

2. Comparar o efeito de dois modos de aplicação de fertilizantes fosfatados ao solo (lanço na superfície do solo x sulco de semeadura) na distribuição do fósforo extraível até 50 cm de profundidade.

3. Comparar o efeito de dois sistemas de cultivo (sistema de preparo convencional x sistema plantio direto) na distribuição do fósforo extraível até 50 cm de profundidade.

4. Avaliar interações entre a fonte de fósforo, o modo de aplicação do fertilizante fosfatado e o sistema de cultivo, na distribuição do fósforo extraível até 50 cm de profundidade.

5. Avaliar a distribuição de matéria orgânica até 50 cm de profundidade.

6. Avaliar o efeito da distribuição de fósforo extraível até 50 cm de profundidade e a produtividade de soja no 14<sup>o</sup> ano de cultivo.

#### **3.3 Hipóteses**

1. A distribuição de fósforo extraível no solo após 14 anos de cultivo depende da fonte de fósforo utilizada (superfosfato triplo e fosfato natural reativo), do modo de aplicação do fertilizante fosfatado (a lanço na superfície do solo ou no sulco de semeadura), do sistema de cultivo (sistema de preparo convencional e plantio direto) e de suas interações.

2. A distribuição de matéria orgânica do solo após 14 anos de cultivo depende do sistema de cultivo (sistema de preparo convencional e plantio direto) e independe da fonte e modo de aplicação do fertilizante fosfatado.

3. As diferenças na distribuição do fósforo extraível em função da fonte e do modo de aplicação do fertilizante fosfatado após 14 anos de cultivo não afetam a produtividade de soja.

#### 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMER, F.; BOULDIN, D.R.; BLACK, C.A.; DUKE, F.R. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P32 equilibration. **Plant and Soil**, 6:391-408, 1955.
- AMOS, B.; WALTERS, D.T. Maize root biomass and net rhizodeposited carbon: An analysis of the literature. **Soil Science Society of America Journal**, 70:1489-1503, 2006.
- ANGHINONI, I. A method for predicting the most efficient phosphate placement for corn using a simulation model. 170 p. **Thesis Ph. D. Soil Science**. University of Purdue, West Lafayette, 1979.
- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, p.537-562. 2004.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 16:349-353, 1992.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, 44:1041-1044, 1980.
- ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. **Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes**. In: **WORKSHOP sobre sistema radicular: metodologias e estudo de casos**. Aracaju: EMBRAPA - Tabuleiros costeiros, 1999. p.57-88.
- ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S.J. Recomendações de uso de fertilizantes no Brasil. In: ESPINOZA, W; OLIVEIRA, A.J. (eds) Simpósio sobre Fertilizantes na Agricultura Brasileira. **Anais...** Brasília, EMBRAPA-DEP, 1984. p.179-204.
- APTHORP, J.N.; HEDLEY, M.J.; TILLMAN, R.W. The effect of nitrogen fertilizer form on the plant availability of phosphate from soil, phosphate rock and monocalcium phosphate. **Fertilizer Research**, 12:269-283, 1987.
- BALDOVIDOS, F.; THOMAS, G.W. The Effect of Soil Clay Content on Phosphorus Uptake. **Soil Science Society of America Journal** 31:680-682, 1967.



- BARBER, S.A. A diffusion and mass flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, 93:39-49, 1962.
- BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. (ed) **The plant root and its environment**. Charlottesville, The University Press of Virginia, 1974. p. 526-564.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1984, 398p.
- BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um Cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo com ênfase na matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:867-694, 1999.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:105-112, 1997.
- BENEDITO, D.S. Eficiência agronômica de fontes alternativas de fósforo e modelo de predição do uso de fosfatos naturais 2007. 121p. **Tese (Doutorado)** - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- BLEVINS, R.L., THOMAS, G.W., CORNELUIS, P.L. Influence of no-tillage and nitrogen fertilization on certain soil properties after 5 years of continuous corn. **Agronomy Journal**, 69:383-386, 1977.
- BOLAN, N.S.; WHITE, R.E.; HEDLEY, M.J. A review of the use of phosphate rocks as fertilizers for direct application in Australia and New Zealand. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, 30:297-313, 1990.
- BOLLAND, M.D.A. Residual value for wheat of phosphors from calciphos, Duchess rock phosphate and triple superphosphate on a lateritic soil in south-western Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, 25:198-208, 1985.
- BOLLAND, M.D.A.; BOWDEN, J.W. Long-term availability of phosphorus from calcined rock phosphate compared with superphosphate. **Australian Journal of Agriculture Research**, 33:1061-1071, 1982.
- BOULDIN, D.R. Mathematical description of diffusion process in the soil-plant system. **Soil Science Society of America Procedures**, 25:476-480, 1961.
- BRASIL Ministério da Agricultura. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes: métodos oficiais**. Brasília, Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária, 2004. 104p.
- BURLE, M. L., MIELNICZUK, J., FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant Soil**, 190:309-316, 1997.

- CALEGARI, A. Seqüestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo argiloso do Sul do Brasil. 2006. 191p. Tese (**Doutorado**) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- CASANOVA, E.F.; SALAS, A.M.; TORO, M. Evaluating the effectiveness of phosphate fertilizers in some Venezuela soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 63:13-20, 2002.
- CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, 41:227-234, 1995.
- COELHO, A.M.; ALVES, V.M.C. Adubação fosfatada na cultura do milho. In: **Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira**, Piracicaba, 2004. Piracicaba, 2004. p.243-283.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10ª ed Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Porto Alegre, 2004. 400p.
- COREY, R.B. Soil test procedures: correlation. In: **Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration, and Interpretation**. (SSSA Special publication, 21), p.15-22, 1987.
- COSTA, S.E.V.G.A. **Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo de solo e da adubação em longo prazo**. Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2008. 106p.
- COWIE, B.A.; HASTIE, M.; HUNT, S.B.; ASGHAR, M.; LACK, D.W. Surface soil nutrient distribution following zero tillage and traditional tillage management. [**Proceedings of The Australian Society of Agronomy**. 1996. Disponível em: [www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/160cowie.htm](http://www.regional.org.au/au/asa/1996/contributed/160cowie.htm). Acesso em: 20/07/2009
- DE MARIA, I.C. & CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 17:471-477, 1993.
- DUIKER, S.W.; BEEGLE, D.B.; Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil & Tillage Research**, 88:30-41, 2006.
- ECKERT, D.J., JOHNSON, J.W. Phosphorus fertilization in no-tillage corn production. **Agronomy Journal**, 77:789-792, 1985.

- EDWARDS, J. H.; BARBER, S. A. Phosphorus uptake rate of soybean roots as influenced by plant age, root trimming, and solution P concentration. **Agronomy Journal**, 68:973-975, 1976.
- ELTZ, F.L.F.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo de solo nas características físicas e químicas de um Latossolo bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 12:259- 267, 1989.
- ESSINGTON, M.E.; HOWARD, D.D. Phosphorus availability and speciation in long-term no-till and disk-till soil. **Soil Science**, 165:144-152, 2000.
- FALLEIRO, R.M.; SOUZA, C.M.; SILVA, C.S.W.; SEDIYAMA, C.S.; SILVA, A.A.; FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.
- FEBRAPDP – FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Área de plantio direto**. Disponível em: [www.febrapdp.org.br](http://www.febrapdp.org.br). Acesso em 28 maio 2009.
- FOX, R.L.; KANG, B.T. Influence of phosphorus fertilizer placement and fertilization rate on maize nutrition. **Soil Science**, 125:34-40, 1978.
- GALRÃO, E.Z. **Avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1976. 67p. (Tese de Mestrado).
- GALRÃO, E.Z.; VOLKWEISS, S.J. Disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 5:114-118, 1981.
- GARCIA, J.P.; WORTMANN, C.S.; MAMO, M.; DRIJBER, R.A.; QUINCKE, J.A.; TARKALSON, D. One-time tillage of no-till: Effects on nutrients, mycorrhizae, and phosphorus uptake. **Agronomy Journal**, 99:1093–1103, 2007.
- GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B.; BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxic Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 166:750-755, 2003.
- GOEDERT, W. J.; REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. Avaliação Agronômica de Fontes de Fósforo para a Região dos Cerrados. In: **Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1985-1987**. Planaltina, DF: EMBRAPA – CPAC, 1991.
- GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W. J. (Ed.). **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel; Brasília: EMBRAPA, Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, p. 129-166, 1986.

- GOEDERT, W. J.; REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. de. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais, fosfatos parcialmente acidulados e termofosfatos em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 25:521-530, 1990.
- GOEDERT, W.J.; LOBATO, E. Avaliação agrônômica de fosfatos em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 8:97-102, 1984.
- GREGORY, P. **Plant roots-growth, activity and interaction with soils**. Oxford: Blackwell Publishing, 2006. 318 p.
- HAMMOND, L.L., CHIEN, S.H.; MOKWUNYE, A.U. Agronomic value of unacidulated and partially acidulated phosphate rocks indigenous to the tropics. **Advances in Agronomy**, 40:89-140, 1986.
- HARGROVE, W.L. Influence of tillage on nutrient uptake and yield of corn. **Agronomy Journal**, 77:763-768, 1985.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho de partícula. **Ciência Rural**, 33:41-47, 2004.
- HOWARD, D. D.; ESSINGTON, M. E.; LOGAN, J. Long-term broadcast and banded phosphorus fertilization of corn produced using two tillage systems. **Agronomy Journal**, 94:51-56, 2002.
- HUGHES, K.A.; HORNE, D.J.; ROSS, C.W.; JULIAN, J.F. A 10-year maize/oat rotation under three tillage systems:2. Plant population, root distribution and forage yields. **Soil & Tillage Research**, 22:145-157, 1992.
- HUSSAIN, I.; OLSON, K.R. EBELHAR, S.A. Long-term tillage effects on soil chemical properties and organic matter fractions. **Soil Science Society of America Journal**, 63:1335-1341, 1999.
- JUNGK, A.; BARBER, S. A. Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. **Agronomy Journal**, 66:554-557, 1974.
- KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, B.C.; KAMPRATH, E.J., (Ed). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980, p.433-470.
- KANABO, J.A., GILKES, R.J. The role of pH in the dissolution of phosphate rock fertilizers. **Fertilizer Research**, 12:165-174, 1987.
- KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, 10:159-206, 1978.
- KLEPKER, D. **Distribuição de fósforo e de raízes no solo e sua relação com o estresse hídrico e o crescimento de milho**. 1996. 178f. Tese (Doutorado) -

- Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- KLEPKER, D. **Nutrientes e raízes no perfil e crescimento de milho e aveia em função do preparo do solo e modos de adubação.** 1991. 117f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:395-401, 1995.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy (Trends in Agriculture Science)** 1:111-115, 1993.
- 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**, 31:111-119, 2001.
- KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. Adubação profunda no sistema plantio direto. In: CURSO SOBRE ASPECTOS BÁSICOS DE FERTILIDADE E MICROBIOLOGIA DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 3., 1999, Passo Fundo, RS. **Resumos de palestras: fertilidade do solo em plantio direto.** Passo Fundo, RS, 1999. p.67-69.
- KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, 56:391-396, 1999.
- KOVAR, J.L.; BARBER, S.A.; KLADIVKO, E.J.; GRIFFITH, D.R. Characterization of soil temperature, water content, and maize root distribution in two tillage systems. **Soil & Tillage Research**, 24:11-27, 1992.
- KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 3: chemical methods.** Madison: SSSA, 1996. p.869-920.
- LAL, R. No-tillage effects on soil properties under different crops in western Nigeria. **Soil Science Society of America Journal**, 40:762-768. 1976.
- 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**, 22:525-528, 2004
- LAWTON, K.; APOSTOLAKIS, C.; COOK, R. L.; HILL, W. L. Influence of particle size, water solubility, and placement of fertilizers on the nutrient value of phosphorus in mixed fertilizers. **Soil Science**, 82:465-476, 1956.

- LINS, I. D. G. **Improvement of soil test interpretations for phosphorus and zinc**. Ph. D. thesis. Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 1987. 317 p.
- LINS, I.D.G.; COX, F.R.; SOUSA, D.M.G. Teste de um modelo matemático para otimizar a adubação fosfatada na cultura da soja em solos sob cerrado com diferentes teores e tipos de argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 13:65-73, 1989.
- LOPES, A.S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. **Sistema Plantio Direto: Bases para o manejo da fertilidade do solo**. Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), São Paulo. 2004. 115 p.
- MASSE, T.W.; OLSEN, R.A.; SKOGLEY, E.O. Characterizing soil fertility by ion diffusive flux measurements. **Plant and Soil**, 47:663-679, 1977.
- MENON, R. G.; CHIEN, S. H.; . HAMMOND, L. L.; ARORA, B. R. Sorption of phosphorus by the iron oxide-impregnated filter paper (P<sub>i</sub> soil test) embedded in soils. **Plant and Soil**, 126:287-94, 1990.
- MENON, R.G.; HAMMOND, L.L.; SISSINGH, H.A. Determination of plant-available phosphorus by the iron hydroxide-impregnated filter paper (P<sub>i</sub>) soil test. **Soil Science Society of America Journal**, 52:110-115, 1989.
- MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de prepare de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:369-374, 1991.
- MIRANDA, L.N. de; VOLKWEISS, S.J. Relações entre a resposta da soja à adubação fosfatada e alguns parâmetros do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 5:58-63, 1981.
- MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a diferentes modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, 16:55-59, 1992.
- MOLLIER, A.; PELLERIN, S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. **Journal of Experimental Botany**, 50:487-497, 1999.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; VIRGENS FILHO, A.C.; SILVEIRA, R.L.V.A.; ABREU, J.B.R. Avaliação da disponibilidade do fósforo no solo por métodos isotópico, químicos e biológico. **Scientia Agricola**, 54:1-2, 1997.
- MOSCHLER, W.W.; SHEAR, G.M.; MARTENS, D.C.; JONES, G.D.; WILMOUTH, R.R. Comparative yield and fertilizer efficiency of no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, 64:229-231, 1972.

- MUZILLI, O. A fertilidade do solo em plantio direto. In: Fancelli, A. L. **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fundação Cargil, 1985. p.147-160.
- MUZILLI, O. Influência do sistema plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7:95-102, 1983.
- MUZILLI, O. Manejo da fertilidade do solo. In: **Plantio direto no Paraná**. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p.43-57. Circular, 23
- NICOLODI, M. **Evolução da noção da fertilidade e sua percepção como uma propriedade emergente do sistema solo**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- 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.. (Org.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.1, 1129p.
- NUNES, R.S; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J.; SOARES, J.R.R. **Impacto dos Sistemas de Plantio Direto e Preparo Convencional nas Interações entre Matéria Orgânica e Fertilidade do Solo**. IX Simpósio Nacional do Cerrado/II SIMPÓSIO Internacional Savanas Tropicais, Brasília. 6p, 2008, CD ROM.
- NYE, P.H. The rate-limiting step in plant nutrient absorption from soil. **Soil Science**, 123:292-297. 1977.
- NYE, P.H.; TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Berkeley, University of California Press. 1977, 342p.
- OLIVEIRA, M.R.G.; NOORDWIJK, M. van.; GAZE, S.R.; BROUWER, G. Auger sampling, ingrowth cores, and pinboard methods, p.175-210, In: SMITH, A.L. et al (ed.) **Root methods: A handbook**. Berlin : Springer-Verlag, 2000.
- OLSEN, S.R.; KEMPER, W.D. Movement of nutrients to plant roots. In: NORMAN, A.G. (ed) **Advances in Agronomy**. New York, Academic press, v.10, p.91-151, 1968.
- OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. Diffusion of phosphorus as related to soil texture and plant uptake. **Soil Science Society of America Procedures**, 27:648-653, 1963.
- OZANNE, P.G.; SHAW, T.C. Advantages of the recently developed phosphate sorption test over older extractant methods for soil phosphate. In: **Transactions of the Ninth International Congress in Soil Science**, Adelaide, (ed. J. W. Holmes), pp. 273–280. International Society of Soil Science. 1968

- PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. Fósforo e Potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, 34:1779-1784, 2004.
- PEDÓ, F. **Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo**. 1985. 92f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.
- 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. 726 p.
- RAIJ, B. van. Métodos de Diagnose de Fósforo no Solo em Uso no Brasil. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S. R. e (Ed.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.563-587, 2004.
- RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2:1-9, 1978.
- RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Fundação Cargill. 1987, 170p.
- RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils by an ion exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 17:547-566, 1986.
- RAMOS, M. A. **Sistemas de preparo mínimo do solo: técnicas e perspectivas para o Paraná**. Ponta Grossa: Embrapa-CNPSO, 1976. 23 p. (Comunicação Técnica, 1).
- RANDALL, G.W.; HOEFT, R.G. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: A review. **Journal of Production in Agriculture**, 1:70-79, 1988.
- REIN, T.A. **Estimativa do fluxo difusivo de fósforo nos solos e avaliação de sua disponibilidade as plantas**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991. 137p. (Tese de Mestrado).
- RESENDE, A.V. **Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado**. Lavras : UFLA, 2004. 169f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36:151-160, 2001.
- RHEINHEIMER, D.S; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 34:2339-2354, 2003.



- SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Ed.). **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS, 1999. p.267-319.
- SÁ, J.C.M. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas de manejo convencional e plantio direto**. 2001. 141p. Tese. (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.
- SÁ, J.C. M.; SANTOS, J. B. dos S.; CARDOSO, E. G.; JUNIOR, D. S.; FERREIRA, C. F.; OLIVEIRA, A. SÁ, M. F. M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S. **Gestão da Matéria Orgânica do Solo, Produção Sustentável e o Seqüestro de Carbono em SPD**. In: 10º Encontro Nacional de Plantio Direto na Palha. Uberaba, 2006.
- SANTOS, D.B.M. **Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema plantio direto**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2009, 81 p. Dissertação de Mestrado.
- SAVANT, N.K.; CHIEN, S.H. Greenhouse evaluation of urea supergranule containing diammonium phosphate for transplanted rice. **International Rice Research Newsletter**, 15:23-24, 1990.
- SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil Tillage Research**, 44:23-34, 1997.
- SHEAR, G.M.; MOSCHLER, W.W. Continuous corn by the no-tillage and conventional tillage methods: a six-year comparison. **Agronomy Journal**, 61:524-526, 1969.
- SIDIRAS, N., PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 9:249-254, 1985.
- SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade De Fósforo Em Solos Avaliada Por Diferentes Extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 34:267-288, 1999.
- SMITH, F.W.; ELLIS, B.C.; GRAVA, J. Use of acid-fluoride solutions for the extraction of available phosphorus in calcareous soils and in soils to which rock phosphate has been added. **Soil Science Society of America Proceedings**, 21:400-404. 1957.
- SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T., ABDALLA, S. R. S. **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.157-200, 2004b.

- SOUSA, D.M.G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E. Eficiência agronômica 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, Ciência do solo e qualidade de vida: **anais**. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999b.
- SOUSA, D.M.G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E. Solubilidade e eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de cerrado. In: IX Simpósio Nacional Cerrado e II Simpósio Internacional Savanas Tropicais: **anais**. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2008.
- SOUSA, D.M.G. de; REIN, T. A.; LOBATO, E.; SOARES, W. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na região dos cerrados. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27, Brasília-DF, Ciência do solo e qualidade de vida: **anais**. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999a.
- SOUSA, D.M.G. de; REIN, T.A. Disponibilidade de Fósforo em Latossolo de Cerrado sob Plantio Direto Adubado com Duas Fontes de Fósforo Avaliada por Diferentes Extratores. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 32, 2009, Fortaleza, CE. [O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios] – CD-Rom- **Resumo expandido**.
- SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.(Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2004. 416p.
- SOUSA, D.M.G. de; MIRANDA, L.N. de; LOBATO, E. **Interpretação de análise de terra e recomendação de adubos fosfatados para culturas anuais nos Cerrados**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1987. 7 p. (EMBRAPA-CPAC. Comunicado Técnico, 51).
- SOUSA, D.M.G. de. **Reações de grânulos de superfosfato triplo em solos e seus efeitos imediatos e residuais sobre as culturas**. 1980. 90p. (Tese de Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; GOEDERT, W.J. Manejo da Fertilidade do solo no Cerrado. In: ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A.G. **Agricultura Tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas**. 2008.
- SOUSA, D.M.G. de; VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó em grânulos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, 11:141-146, 1987.
- STRYKER, R.B.; GILLIAM, J.W.; JACKSON, W.A. Nonuni-form phosphorus distribution in the root zone of corn: Growth and phosphorus uptake. **Soil Science Society of America Proceedings**, 38:334-340. 1974.

- TEDESCO, M. J., VOLKWEISS, S. J., BOHEN, H. Análises de solo, plantas e outros materiais. UFRGS: Faculdade de Agronomia, **Boletim Técnico n. 5**, RS, 1985.
- THOMAS, G.W; PEASLEE. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON. J.D. (Eds) **Soil Testing and Plant Analysis**, 1 ed. Madison. p. 111-132, 1973.
- TRIPLETT Jr., G.B., VAN DOREN, Jr., D.M. Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization of non-tilled maize. **Agronomy Journal**, 61:637-639, 1969.
- VAIDYANATHAN, L.V.; NYE, P.H. The measurement and mechanism of ion diffusion in soils. II. An exchange resin paper method for measurement of the diffusive flux and diffusion coefficient of nutrient ions in soils. **Journal of Soil Science**, 17:175-183. 1966.
- VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VOLKWEISS, S.J.; COREY, R.B. Método de extração do fósforo de solos controlada por difusão para avaliar a sua disponibilidade as plantas. Reuniao Brasileira de Fertilidade do Solo, 18. Guarapará, ES. p.28-29, 1988. (**Resumos**).
- WEBB, J. R.; PESEK JR, J. T. An evaluation of phosphorus fertilizers varying in water solubility: II. Broadcast applications for corn. **Soil Science Society of America Proceedings**, 23:381-384, 1959.
- WELCH, L. F.; MULVANEY, D. L.; BOONE, L. V.; MCKIBBEN, G. E.; PENDLETON, J. W. Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn. **Agronomy Journal**, 58:283-287, 1966.
- WIETHÖLTER, S. Um modelo para avaliar a disponibilidade de nutrientes baseado em teoria de difusão. In: CABALLA ROSAND, P. (Ed.) Reciclagem de nutrientes e agricultura de baixos insumos nos trópicos. **Anais** do Simpósio...Ilheus, CEPLAC/SBCS. P. 104-148, 1985.
- WILD, A. Mass flow and diffusion. In: GREENLAND, D.J.; HAYES, M.H.B. (eds) **The chemistry of soil processes**. Chichester, Johs Wiley & Sons. p.37-80, 1980.
- WÜNSCHE, W.A., DENARDIN, J.E. Perdas de solos e escorrimento de água sob chuva natural em Latossolo Vermelho Escuro nas culturas de trigo e soja. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO. 2. 1978. Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo, EMBRAPA, CNPTrigo: 1978. p.289-296.

ZAPATA, E.; ZAHARAH, A.R. Phosphorus availability from phosphate rock and sewage sludge as influenced by the addition of water soluble phosphate fertilizer. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 63:43-48, 2002.

ZEE, S.E.A.T.M. van der; FOKKING, L.G.T.; RIEMSDIJK, W.H. van. A new technique for assessing of reversibly adsorbed phosphate. **Soil Science Society of America Journal**, 51:599-604, 1987.

## **CAPÍTULO ÚNICO**

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, a produção agrícola brasileira, que era realizada sob sistema de preparo convencional (SPC) passa a gradativamente adotar o sistema plantio direto (SPD) devido às inúmeras vantagens desse sistema, como acúmulo de matéria orgânica (Bayer et al. 2000c; Costa et al. 2008), menor temperatura e maior umidade volumétrica da camada superficial (Costa et al. 2003), redução da perda de solo e nutrientes por erosão (Hernani et al. 1999), proporcionando uma nova dinâmica de fertilidade do solo (Nicolodi et al. 2008). No SPD, uma importante alteração que ocorre é o acúmulo gradual de nutrientes nas camadas superficiais (Nunes et al. 2008), devido a aplicação de fertilizantes e corretivos nessa região (DeMaria et al. 1999), bem como da ciclagem de nutrientes (Santos & Tomm, 2003). Uma vez que o fósforo (P) apresenta baixa mobilidade no solo (Barber, 1984) e baixíssima disponibilidade nos solos oxídicos (Novais et al., 2007), isso pode afetar o suprimento das plantas, já que a absorção das raízes é diretamente dependente do volume de solo adubado, ou seja da distribuição dos níveis de P no perfil (Anghinoni, 1992; Model & Anghinoni, 1992).

Para que ocorra adequada absorção de P, crescimento e produtividade das culturas e por fim elevada eficiência dos fertilizantes fosfatados, estes devem ser aplicados de maneira adequada no solo, permitindo sua melhor localização em relação às raízes das plantas (Anghinoni & Barber, 1980).

Os modos de aplicação mais utilizados são a lanço, na superfície, com ou sem incorporação, no sulco de plantio, em cova e em faixas (Sousa et al., 2004). O manejo preferencial da adubação fosfatada pelos produtores da região do Cerrado constitui de aplicações no sulco de semeadura de fontes solúveis de P. Apesar de ampliar o gradiente natural de P no perfil do solo, principalmente sob SPD, aplicações de adubos fosfatados na superfície constituem uma interessante alternativa em sistemas de produção que se beneficiam pela adubação separada do plantio, antecipada ou após este, como em regiões produtoras de sementes de soja ou aquelas em que há possibilidade de realizar safrinhas.

A escolha da fonte de P a ser utilizada normalmente depende do custo por unidade de  $P_2O_5$  e de sua eficiência agrônômica (capacidade de suprir as plantas) (Prochnow et al., 2003), sendo que esta é influenciada pela solubilidade da fonte empregada, por sua granulometria, por propriedades do solo como pH, teores de cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e P, capacidade de retenção do P, teor de matéria orgânica do solo (MOS) e

capacidade de troca catiônica (CTC), pelas práticas de manejo como sistema de cultivo e modo de aplicação, que determinam a grandeza do contato do fertilizante com o solo, influenciando, conseqüentemente, na taxa de reação entre eles e pela espécie empregada (anual, perene ou pastagem).

Os fertilizantes fosfatados de elevada solubilidade em água são os mais utilizados na agricultura mundial devido a sua maior eficiência agronômica (Bolland & Bowden, 1982), para quaisquer condições de solo e de cultura, correspondendo a 95% do  $P_2O_5$  utilizado na agricultura brasileira (51% como superfosfato simples - SFS e superfosfato triplo - SFT e 44% como fosfato monoamônico - MAP e fosfato diamônico - DAP). No entanto, é também bastante conhecido que essas fontes, quando adicionadas aos solos tropicais ácidos, de alta capacidade de fixação de P, são rapidamente convertidas a formas indisponíveis às plantas, podendo ter sua eficiência diminuída ao longo do tempo (Bolland, 1985; Kordörfer et al., 1999; Ghosal et al., 2003; Prochnow et al., 2003).

Uma alternativa que tem crescido é quanto ao uso de fosfatos naturais reativos, que limitam a adsorção específica pelas argilas promovendo solubilização gradual do P e podendo proporcionar uma maior eficiência do fertilizante (Novais et al. 2007). Diversos experimentos têm sido conduzidos nos anos mais recentes para determinar as melhores condições de solo e da cultura para o seu uso (Khasawneh & Doll, 1978; Zapata & Zaharah, 2002; Casanova et al., 2002).

Desta forma, os distintos sistemas de cultivo e manejos do fertilizante fosfatado contribuirão, de forma significativa, no acesso do P pela planta e por fim na produção das culturas, uma vez que o P é um importante modulador da produção. Diante disso, este trabalho objetivou caracterizar a distribuição de P em um Latossolo Vermelho do Cerrado cultivado por 14 anos com as culturas de soja e milho recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $P_2O_5$  como SFT e FNR aplicados no sulco de semeadura e a lanço sob SPC e SPD, tendo o cerrado nativo como referência. Para tal, foram utilizados três métodos de extração de P disponível no solo: Mehlich I, usado como padrão na maior parte do território brasileiro; o Bray 1, indicado para as fontes apatíticas de P; e Resina, usado como padrão em alguns estados do sul do Brasil.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição do experimento

O estudo foi realizado numa área experimental localizada na Embrapa Cerrados, em Planaltina – DF, com altitude de 1.014 m, clima Cwa na classificação de Köppen, precipitação média anual de 1.570 mm e temperatura média anual de 21,3 °C. O relevo caracteriza-se como plano, a vegetação original é o Cerrado e o solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso (64 % de argila).

O experimento foi estabelecido tendo como objetivo principal à avaliação agronômica de fontes, níveis e modo de aplicação do P no solo, sendo uma faixa cultivada sob sistema de preparo convencional (SPC), constituído de uma aração até 20 cm de profundidade com arado de discos e uma grade niveladora, e outra, distante 8 metros da primeira, cultivada sob sistema plantio direto (SPD).

No experimento o delineamento utilizado foi de faixas em esquema fatorial completo (2x2) com três repetições. Os tratamentos originais estão relacionados na Tabela 01.

A área do experimento foi desmatada no ano de 1976, permanecendo sem uso agrícola até o ano de 1985, quando a vegetação que se restabelecia foi desmatada e se procedeu o preparo da área, corrigindo apenas a acidez por meio de calagem, com dose de 4 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (PRNT 100%). A área foi cultivada com mucuna-preta (*Mucuna pruriens*), guandu (*Cajanus cajan*) e crotalária (*Crotalaria juncea*) nas safras 1985/86, 1986/87, 1987/88, respectivamente e após esse período permaneceu sob vegetação espontânea até o ano de 1994 quando se estabeleceu o experimento.

Foram realizadas análises química e granulométrica do solo em setembro de 1994 (Tabela 02) e em seguida a correção dos níveis de acidez e fertilidade, com exceção de fósforo, de acordo com Sousa & Lobato, (2004) visando o máximo potencial produtivo das culturas. Foram aplicados 0,38 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (PRNT 100%), elevando a saturação por base a 50%, 3 t ha<sup>-1</sup> de gesso agrícola, micronutrientes na forma de FTE BR-10, na dose de 60 kg ha<sup>-1</sup>, potássio na forma de KCl, na dose de 180 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>.

O primeiro cultivo foi realizado na safra 1994/95 com a cultura da soja, que foi a cultura cultivada até a safra 2002/03 (9 cultivos). Neste período não houve a utilização de plantas de cobertura no inverno. Em julho de 2003 cultivou-se o milho como planta de cobertura, que foi cortado com roçadeira 30 dias antes do plantio da cultura principal,



sendo esta prática mantida durante os anos que se seguiram. Na safra 2003/04 cultivou-se o milho seguido de sucessão milho/soja (Tabela 03).

**Tabela 01.** Descrição dos tratamentos originais de experimento visando avaliar efeito de fontes e doses de adubo fosfatado nas produções agrícolas sob sistemas de preparo convencional e plantio direto.

Tratamento	Fonte <sup>(1)</sup>	Granulometria	Dose kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>		Modo de aplicação	Sistema de cultivo
			1º ano	2º ano em diante		
1	-	-	0	-		SPC
2	SFT	Grão	80	-	Laço	SPC
3	SFT	Grão	160	-	Laço	SPC
4	SFT	Grão	240	-	Laço	SPC
5	SFT	Grão	480	-	Laço	SPC
6	SFT	Grão	80	80	Laço	SPC
7	SFT	Grão	80	80	Sulco	SPC
8	SFT	Grão	240+80	80	Lan/Sul.	SPC
9	HNG	Farelado	80	-	Laço	SPC
10	HNG	Farelado	160	-	Laço	SPC
11	HNG	Farelado	240	-	Laço	SPC
12	HNG	Farelado	480	-	Laço	SPC
13	HNG	Farelado	80	80	Laço	SPC
14	HNG	Farelado	80	80	Sulco	SPC
15	ARAD	Farelado	240	-	Laço	SPC
16	ARAD	Farelado	80	80	Sulco	SPC
17	P. Ac. ARAD	Farelado	240	-	Laço	SPC
18	P. Ac. ARAD	Farelado	80	80	Sulco	SPC
1	SFT	Grão	80	80	Laço	SPD
2	SFT	Grão	80	80	Sulco	SPD
3	HNG	Farelado	80	80	Laço	SPD
4	HNG	Farelado	80	80	Sulco	SPD

<sup>(1)</sup> SFT = superfosfato triplo; HNG = hiperfosfato natural de Gafsa; P. Ac. ARAD = fosfato natural ARAD parcialmente acidulado.

**Tabela 02.** Análise química e granulométrica do solo antes da implementação do experimento, na camada de 0 cm a 20 cm <sup>(1)</sup>.

pH	P	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	Matéria orgânica	Areia	Silte	Argila
	mg dm <sup>-3</sup>		-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----		g kg <sup>-1</sup>	-----	%	-----
5,4	1,0	43,1	0,08	2,41	2,01	5,27	28,0	27	9	64

<sup>(1)</sup> Segundo os métodos descritos em Embrapa (1997).

**Tabela 03.** Cronograma de cultivos principais e de cobertura no experimento em estudo.

Safra	Cultivo de cobertura	Cultivo principal	Safra	Cultivo de cobertura	Cultivo principal
1994/95	-	Soja	2002/03		Soja
1995/96	-	Soja	2003/04	Milheto	Milho
1996/97	-	Soja	2004/05	Milheto	Milho
1997/98	-	Soja	2005/06	Milheto	Soja
1998/99	-	Soja	2006/07	Milheto	Milho
1999/00	-	Soja	2007/08	Milheto	Soja
2000/01	-	Soja	2008/09	Milheto <sup>(1)</sup>	Milho
2001/02		Soja			

<sup>(1)</sup> A amostragem de solo foi realizada após o corte do milheto

As dimensões das parcelas experimentais foram de 8 m x 4 m (32 m<sup>2</sup> de área), com espaçamento entre linhas de 50 cm para a soja, 80 cm para o milho e 20 cm para o milheto. A área útil considerada para a cultura da soja é aquela que compreendem 4 linhas de plantio (espaçamento 0,5 m) numa extensão de 5 m, correspondendo, então, a 10m<sup>2</sup> e para a cultura do milho é aquela que compreende 3 linhas de plantio (espaçamento 0,8 m) numa extensão de 5 m, correspondendo, então, a 12m<sup>2</sup>. A área apresentava irrigação complementar, para casos de verânicos prolongados.

As adubações anuais foram 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio e 30 kg ha<sup>-1</sup> de S na forma de gesso agrícola, aplicados a lanço simultaneamente ao plantio da cultura da soja e milho, além da adição de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N na cultura do milho na forma de uréia até a safra agrícola de 2006/07. Em julho de 2008 o milheto utilizado como planta de cobertura recebeu adubação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia visando sua posterior disponibilização ao milho cultivado subsequentemente. Também foram aplicados, de acordo com o tratamento (Tabela 01), 80 Kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de superfosfato triplo (SFT) e hiperfosfato natural de Gafsa, de agora em

diante denominado apenas fosfato natural reativo (FNR), cujas características estão apresentadas na Tabela 04.

**Tabela 04.** Características dos fertilizantes fosfatados utilizados no experimento <sup>(1)</sup>.

Fonte de fósforo <sup>(2)</sup>	Granulometria	CaO	Característica		
			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	Solubilidade em relação ao P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total	
				Ac. cítrico 2 % (1:100)	Ac. fórmico 2 % (1:100)
SFT	Granulado	13	47,6	92	88
FNR	Farelado	37	28,2	44	74

<sup>(1)</sup> Análises efetuadas com amostras moídas (< 0,063 mm).

<sup>(2)</sup> SFT = Superfosfato triplo; FNR = Fosfato natural reativo.

## 2.2 Seleção dos tratamentos e amostragem do solo

Para a realização deste trabalho foram selecionadas 27 parcelas experimentais, que alocavam os tratamentos T1, T6, T7, T13 e T14 no SPC e T1, T2, T3 e T4 no SPD, ou seja: SFT e FNR, em aplicação anual a lanço e no sulco, na dose de 80 Kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ambos cultivados sob SPC e SPD, além de testemunha sem adubação anual de P sob SPC. O cerrado nativo distante 50 metros do experimento foi tomado como referência.

A Figura 01 oferece a idéia de localização dos tratamentos selecionados dentro do experimento original sendo que para sua perfeita compreensão torna-se necessário consultar a Tabela 01 apresentada anteriormente.

# CERRADO

SISTEMA DE PREPARO CONVENCIONAL												SISTEMA DE PLANTIO DIRETO										
BLOCO III	T5	46	T11	47	T1	48	T15	49	T8	50	T17	51	T2	52	T4	53	T6	54	Cabeceira C			
	T3	37	T10	38	T9	39	T18	40	T13	41	T7	42	T12	43	T16	44	T14	45		T4	65	T3
BLOCO II	T2	28	T13	29	T1	30	T3	31	T10	32	T15	33	T14	34	T6	35	T11	36	Cabeceira B			
	T4	19	T17	20	T7	21	T8	22	T18	23	T9	24	T5	25	T12	26	T16	27		T1	61	T2
BLOCO I	T18	10	T4	11	T2	12	T13	13	T14	14	T12	15	T1	16	T15	17	T6	18	Cabeceira A			
	T8	1	T3	2	T11	3	T17	4	T5	5	T10	6	T9	7	T7	8	T16	9		T2	57	T4
																			T1	55	T3	56

**Figura 01.** Croqui da área experimental original com os tratamentos selecionados para estudo.

As amostras de solo foram coletadas em outubro de 2008, em sete camadas (0 a 2,5 cm; 2,5 a 5 cm; 5 a 10 cm; 10 a 20 cm; 20 a 30 cm, 30 a 40 cm e 40 a 50 cm) sendo uma amostra composta por cada parcela do experimento ou por ponto do Cerrado. Cada amostra composta dos tratamentos de adubação no sulco foi formada por 30 sub-amostras: 6 pontos dentro de cada parcela x 5 sub-amostras por ponto (uma na linha e 4 nas entre-linhas) conforme mostrado na Figura 02.

### Linha de Plantio



**Figura 02.** Exemplo de coleta de 5 sub-amostras da linha de plantio em direção às entre-linhas.

Como na safra 2007/2008 a área foi cultivada com soja, plantada em espaçamento de 50 cm, os centros de cada sub-amostra distaram entre si em 5 cm, representando um volume amostrado de 50 % da fatia preconizada pela CFS RS/SC (1995) e atendendo ao método alternativo ao da fatia, que consiste em coletar uma amostra na linha e 3 amostras em cada entre-linha (trado calador - diâmetro < 3 cm) de espaçamento 50 cm (CQFS RS/SC, 2004).

Para os tratamentos de adubação a lança foram tomadas 20 sub-amostras para cada amostra composta coletadas aleatoriamente na área útil das parcelas. No Cerrado foram escolhidos três pontos representativos onde se amostram 20 sub-amostras para cada amostra composta. Para todas as sub-amostras o trado com anel volumétrico de  $100 \text{ cm}^3$  e 5 cm de diâmetro foi utilizado na amostragem das três primeiras camadas de solo (0 a 2,5 cm; 2,5 a 5 cm; 5 a 10 cm). A partir desta profundidade foi utilizado o

trado holandês no mesmo buraco formado pelo anel volumétrico, obtendo as 4 camadas seguintes (10 a 20 cm; 20 a 30 cm, 30 a 40 cm e 40 a 50 cm).

Depois de coletadas, as amostras foram secas ao ar, maceradas e todo o solo amostrado foi passado em peneira de malha de 1 mm. Foi então realizada a determinação do P extraível por Mehlich I, conforme Embrapa (1997), Bray-1, conforme Bray & Kurtz (1945) e Resina trocadora de íons, conforme Raij e Quaggio (2001) e matéria orgânica, conforme Embrapa (1997).

Para os cálculos envolvendo massa de solo foi determinada a densidade do solo nos tratamentos adubados com SFT no sulco de semeadura sob SPC e SPD, nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Foi utilizado o método do anel volumétrico (Embrapa, 1997) e amostrados 4 pontos por parcela, sendo os dados de cada parcela uma média aritmética entre eles. Os valores médios obtidos nas parcelas experimentais para as camadas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm foram respectivamente 0,98 g cm<sup>-3</sup>, 0,99 g cm<sup>-3</sup>, 1,02 g cm<sup>-3</sup> e 1,06 g cm<sup>-3</sup> para o SPC e 0,92 g cm<sup>-3</sup>, 1,00 g cm<sup>-3</sup>, 1,02 g cm<sup>-3</sup> e 1,02 g cm<sup>-3</sup> para o SPD.

### 2.3 Procedimentos analíticos

No método Mehlich I, à 5 cm<sup>3</sup> de cada amostra de solo foi adicionado 50 mL de solução extratora (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125N + HCl 0,05 N), passando então por uma agitação de 5 minutos. Após um repouso de 16 horas para decantação do solo, foram misturados 5 mL da solução com 5mL de água e 10 mL de “solução de trabalho” (1 g de ácido ascórbico + 300 mL de molibdato de amônio). Os teores de P foram determinados por espectrofotometria a 820 nm.

No método Bray 1, à 5 cm<sup>3</sup> de cada amostra de solo foi adicionado 40ml de solução extratora (HCl 0,025N + NH<sub>4</sub>F 0,03 N), passando então por uma agitação de 1 minuto. As soluções foram imediatamente filtradas em papel filtro Quantitativo JP42 Faixa 44 Azul de 11 cm de diâmetro. Foram misturados 5 mL do filtrado com 5 mL de água destilada e 15 mL de solução redutora B (0,88 g de ácido ascórbico + 10 mL de solução de molibdato de amônio + H<sub>2</sub>O deionizada q.s.p. 300 mL). Após 40 minutos de repouso, os teores de P foram determinados por espectrofotometria a 680 nm.

No método de Resina trocadora de íons, 2,5 cm<sup>3</sup> de cada amostra de solo foi pulverizado por agitação com bolinha de vidro em 25 mL de água destilada por 15 minutos. Em seguida, a bolinha foi retirada e acrescentados 2,5 cm<sup>3</sup> da resina, colocada

então para agitar por 16 horas com o solo. Após esse período, a resina foi separada do solo com o uso de peneiras e, após repouso de 30 minutos em 50 mL da solução extratora ( $\text{NH}_4\text{Cl}$  0,8 N c+  $\text{HCl}$  0,2 N), foi colocada para agitar por mais 1 hora para extração do P da resina. Depois de diluir 4 mL do extrato com 16 mL da solução diluída de molibdato de amônio e aguardar 15 minutos, foram feitas as leituras em espectrofotômetro a 660 nm.

A determinação de matéria orgânica do solo foi determinada por oxidação úmida com  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  de acordo com Embrapa (1997).

As análises de P e matéria orgânica das amostras de solo foram realizadas no Laboratório de Química do Solo da Embrapa Cerrados, em Planaltina - DF.

## 2.4 Análises estatísticas

Os resultados dos teores de P, MOS e produtividade de soja foram analisados estatisticamente utilizando o programa SAS (Statistical Analysis System) 9.1 considerando o experimento como blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com o tratamento sistema (S) nas parcelas maiores e um fatorial 2x2 dos tratamentos fonte de P (F) e modo de aplicação (M), distribuídos aleatoriamente dentro de cada uma delas.

A análise de variância dos resultados obtidos foi feita considerando o modelo misto (pela presença de variáveis fixas e aleatórias) de máxima verossimilhança restrita via PROC MIXED do SAS 9.1. Esse método foi escolhido, pois estima os componentes de variância de forma independente para os efeitos fixos e aleatórios (Oliveira et al., 2006) e por tratar-se de um experimento casualizado. Assim para as condições do presente estudo o modelo assume duas formas como se segue abaixo.

Para todas as variáveis resposta (Y) que sejam características da planta (produção de grãos) ou do solo, mas sem avaliação nas diversas profundidades, ou seja, com uma média de todas as profundidades, o modelo assume a seguinte forma (modelo 1):

$$Y_{ijk} = \mu + B_j + S_i + \text{Erro}_{ij} + F_k + A_l + (FA)_{kl} + (SF)_{ik} + (SA)_{il} + (SFA)_{ikl} + \text{Erro}_{ijkl}$$

onde:  $\mu$  = média geral dos dados; B = bloco ( $j = 1,2,3$ ); S = Sistema de preparo ( $i = 1,2$ ); F = Fonte de fósforo ( $k = 1,2$ ); A = Modo de aplicação ( $l = 1,2$ ); Erro = erro experimental.

Para todas as variáveis resposta (Y) que sejam características do solo avaliadas como distribuição em profundidade (dados repetidos no espaço) o modelo assume a seguinte forma (modelo 2):

$$Y_{ijkl} = \mu + B_j + S_i + \text{Erro}_{ij} + F_k + A_l + (F \times A)_{kl} + (SF)_{ik} + (SA)_{il} + (SFA)_{ikl} + \text{Erro}_{ijkl} + P_m + (PS)_{im} + PF_{km} + PA_{lm} + PFA_{klm} + PSF_{ikm} + PSA_{ilm} + PSFA_{iklm} + \text{Erro}_{ijklm},$$

onde:  $\mu$  = média geral dos dados; B = bloco (j = 1,2,3); S = Sistema de preparo (i = 1,2); F = Fonte de fósforo (k = 1,2); A = Modo de aplicação (l = 1,2); P = profundidade (m = 1,2,3,4,5,6,7); Erro = erro experimental.

Quando a análise de variância apontou significância o teste de hipótese de Student (t) ( $P < 0,05$ ) foi utilizado para distinção das médias.

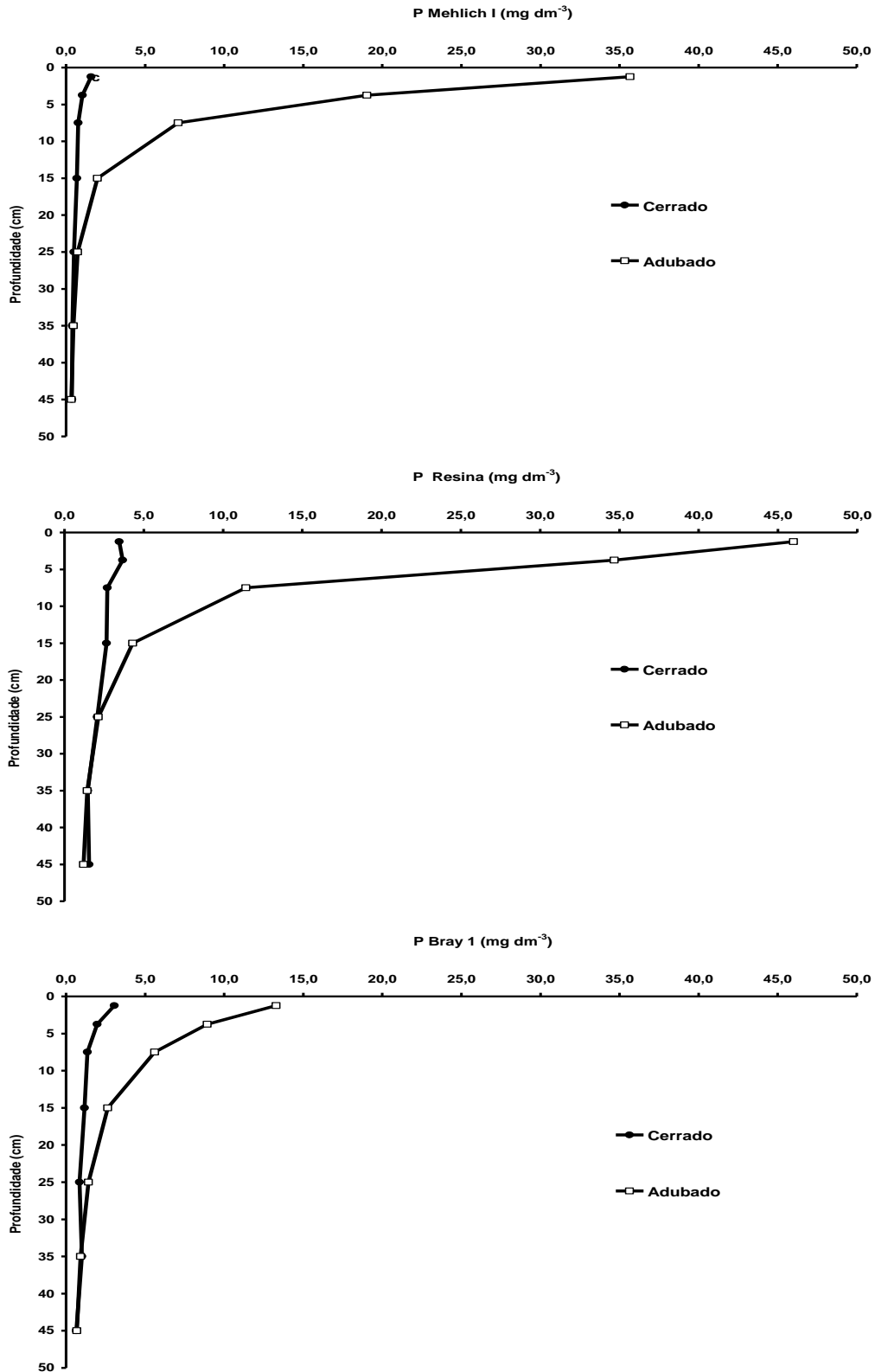
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da implantação do experimento o solo apresentava teor de P extraível por Mehlich I de  $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$  na camada de 0-20 cm (Tabela 02), considerado muito baixo segundo Sousa et al. (2004). Desta forma, primeiramente, era esperado aumento nos teores de P no solo, decorrentes da adubação fosfatada dos diversos tratamentos propostos no experimento.

Isso pode ser observado na Figura 03 que mostra que a adubação fosfatada por 14 anos proporcionou grandes alterações na distribuição do P nos primeiros 10 cm do solo e menor alteração na camada 10-20 cm em comparação com a área de cerrado nativo localizada ao lado do experimento. Os baixos teores de P na área original asseguram que os efeitos encontrados sejam resultados apenas dos tratamentos aplicados.

Utilizando parte dos dados de distribuição de P no solo apresentados na Figura 03 e a interpretação da análise de solo para P extraível por Mehlich I para culturas anuais em sequeiro no Cerrado segundo Sousa et al. (2004) elaborou-se a Tabela 05 que apresenta as classes de disponibilidade de P no solo extraído por Mehlich I, em sete camadas de solo para a média dos tratamentos adubados com SFT após 14 anos de cultivo, contrastando com o cerrado.





**Figura 03.** Distribuições do P extraível em um Latossolo Vermelho muito argiloso sob vegetação natural de cerrado e cultivado por 14 anos, avaliado por Mehlich I (a), Resina (b) e Bray 1 (c). O tratamento adubado corresponde à média entre sistema de preparo convencional (SPC) e sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo e fosfato natural reativo, aplicados a lanço na superfície e no sulco de semeadura.

**Tabela 05.** Classes de disponibilidade <sup>(1)</sup> de P extraível por Mehlich I para culturas anuais em sequeiro no Cerrado para sete camadas de solo sob duas condições: cerrado nativo e média dos tratamentos adubados após 14 anos de cultivo.

Camada (cm)	Condição	
	Cerrado	Adubado <sup>(2)</sup>
0-2,5	Muito baixo	Alto
2,5-5	Muito baixo	Alto
5-10	Muito baixo	Médio
10-20	Muito baixo	Muito baixo
20-30	Muito baixo	Muito baixo
30-40	Muito baixo	Muito baixo
40-50	Muito baixo	Muito baixo

<sup>(1)</sup> De acordo com Sousa et al., (2004).

<sup>(2)</sup> Média dos tratamentos sob sistema preparo convencional e plantio direto adubados com SFT na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados a lanço e no sulco de semeadura.

Em segundo lugar eram esperadas diferentes respostas da cultura da soja às combinações entre manejos da adubação fosfatada e sistemas de cultivo, principalmente nos tratamentos utilizados no presente trabalho, onde o solo não foi corrigido com P antes do primeiro cultivo.

Isso foi observado nos três primeiros anos do experimento, quando a produtividade de soja entre os tratamentos aplicados variou de 635 kg ha<sup>-1</sup> a 1470 kg ha<sup>-1</sup> no primeiro ano, 786 kg ha<sup>-1</sup> a 1856 kg ha<sup>-1</sup> no segundo ano e de 885 kg ha<sup>-1</sup> a 2244 kg ha<sup>-1</sup> no terceiro ano, com a testemunha sem adubação sob SPC produzindo 673 kg ha<sup>-1</sup>, 145 kg ha<sup>-1</sup> e 150 kg ha<sup>-1</sup> no 1º, 2º e 3º anos respectivamente, evidenciando se tratar de um solo pobre e responsivo a adubação fosfatada.

Uma vez ressaltado que os tratamentos aplicados alteraram a condição original de distribuição de P no solo (Figura 03 e Tabela 05) e afetaram de maneira distinta as produtividades de soja, de agora em diante, a discussão se seguirá avaliando como cada um dos tratamentos adubados afetaram a distribuição de P no solo após 14 anos de cultivo, o que corresponde ao objetivo principal do presente trabalho, sendo feito ao final um paralelo entre a distribuição de P no solo e o rendimento de grãos de soja no 14º ano e rendimento acumulado de soja e milho ao longo dos 14 anos.

### 3.1 Distribuição de P extraível no solo

#### 3.1.1 Efeito geral da adubação fosfatada

Para avaliar o efeito dos diversos tratamentos e suas interações na distribuição do P extraível avaliado por três extratores, foi feita a análise de verossimilhança com estrutura fatorial utilizando somente os tratamentos que receberam adubação fosfatada (Tabela 06).

**Tabela 06.** Significâncias ( $Pr > F$ ) dos efeitos de sistema de cultivo (Sist), fonte de fósforo (Fonte), modo de aplicação do adubo fosfatado (Modo), profundidade de amostragem (Prof) e diversas interações possíveis para os teores de fósforo extraível por Mehlich-I, Resina e Bray 1, em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob dois sistemas de cultivo (sistema de preparo convencional ou sistema plantio direto) e recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em duas fontes (superfosfato triplo ou fosfato natural reativo) e em dois modos de aplicação (lanço ou sulco).

Causa de variação	Mehlich I	Resina	Bray 1
	Pr > F		
Fonte	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Modo	< 0,0001	< 0,0001	0,0241
Sist	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Modo	< 0,0001	< 0,0001	<b>0,6242</b>
Fonte x Sist	< 0,0001	< 0,0001	0,0328
Modo x Sist	< 0,0001	< 0,0001	0,0006
Fonte x Modo x Sist	< 0,0001	< 0,0001	<b>0,0594</b>
Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Modo x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Sist x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Modo x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Sist x Prof	< 0,0001	< 0,0001	0,0020
Modo x Sist x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
Fonte x Modo x Sist x Prof	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0066

Dentre as causas de variação do teor de P no solo avaliado por Mehlich I e Resina após 14 anos de cultivo da área, houve efeito altamente significativo ( $p < 0,01$ ) do sistema de cultivo (Sist), da fonte de P do fertilizante (Fonte) e seu do modo de aplicação (Modo), da distribuição vertical avaliada em sete camadas de solo até 50 cm de profundidade (Prof), bem como de todas as suas interações. Quando o extrator utilizado foi o Bray 1 alguns efeitos não foram significativos ( $p > 0,05$ ).

Uma vez que foram avaliados oito tratamentos envolvendo combinações de sistemas de cultivo, fonte do fertilizante fosfatado e modo de aplicação em sete camadas de solo e por três extratores de P percebe-se que o número de dados obtidos foi muito grande. Assim os efeitos dos tratamentos, suas justificativas e implicações agrônômicas serão discutidas partindo do mais simples até o mais complexo. Isso, do ponto de vista estatístico significa apresentar e discutir interações duplas, triplas e quádrupla, nesta seqüência. No entanto, não serão discutidas todas as interações possíveis, mas apenas aquelas que melhor elucidam as questões levantadas e atendem aos objetivos propostos no presente trabalho.

### **3.1.2 Efeito das fontes de fertilizante fosfatado**

As duas fontes de fertilizantes utilizadas neste trabalho, SFT e FNR, apresentam características muito contrastantes, principalmente quanto à dinâmica de reação no solo que é influenciada principalmente pela sua natureza química (Lindsay et. al., 1962; Khasawneh et al., 1974, 1979; Sample et al., 1979), pela capilaridade e tamanho dos grânulos, teor de P (Lehr et. al, 1959; Lindsay & Stephenson, 1959) e cátion acompanhantes do P no fertilizante (Lindsay et. al., 1962). Algumas dessas características são diferentes entre as duas fontes (Tabela 04) de modo que o SFT apresenta-se como uma fonte solúvel de P, dissolvendo-se rapidamente no solo e disponibilizando prontamente esse nutriente para as plantas (Bolland e Bowden, 1982) enquanto o FNR é uma fonte de P de baixa solubilidade, liberando esse nutriente paulatinamente no solo (Bolland, 1985).

Diante destes contrastes era esperado efeito da fonte de fertilizante fosfatado, bem como de interações que a envolvessem, na distribuição dos teores de P no solo. Isso de fato foi confirmado pela análise de verossimilhança apresentada na Tabela 06 de modo que o efeito da fonte pode ser verificado na Tabela 07, que considera a distribuição de P até 50 cm de profundidade e independente do modo de aplicação e sistema de cultivo (média entre as aplicações a lanço e no sulco de semeadura sob SPC e SPD).

Percebe-se claramente que a interpretação dos dados da Tabela 07 dependem do extrator utilizado para estimar a disponibilidade de P, de modo que para o Mehlich I e Resina, os maiores teores foram obtidos na presença de FNR enquanto que quando o extrator utilizado foi o Bray 1 os maiores teores foram obtidos na presença de SFT.

Sendo assim, antes de analisar os efeitos das fontes na distribuição do P no solo cabe uma breve explanação a respeito das diferenças de comportamento dos extratores frente às fontes de P utilizadas no presente trabalho.

**Tabela 07.** Distribuição do P extraível no solo avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 em um Latossolo cultivado por 14 anos recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo ou fosfato natural reativo independente do modo de aplicação e sistema de preparo (média entre as aplicações a lanço e no sulco sob sistema de preparo convencional e plantio direto).

Camadas	Fonte de fósforo	
	Superfosfato triplo	Fosfato natural reativo
cm	----- P Mehlich I (mg dm <sup>-3</sup> )-----	
0-2,5	11,0 aB	60,3 aA
2,5-5,0	7,2 aB	30,9 bA
5,0-10	4,0 bB	10,1 cA
10-20	1,4 cB	2,5 dA
20-30	0,7 dA	0,7 eA
30-40	0,4 eA	0,5 fA
40-50	0,3 fA	0,3 gA
0-20 <sup>(1)</sup>	4,0 B	15,2 A
cm	----- P Resina (mg dm <sup>-3</sup> )-----	
0-2,5	22,7 aB	69,2 aA
2,5-5,0	14,7 bB	54,7 bA
5,0-10	8,8 cB	14,1 cA
10-20	3,7 dB	4,9 dA
20-30	2,2 eA	2,0 eA
30-40	1,6 fA	1,3 fA
40-50	1,2 fA	1,2 fA
0-20 <sup>(1)</sup>	8,7 B	21,5 A
cm	----- P Bray 1 (mg dm <sup>-3</sup> )-----	
0-2,5	16,3 aA	10,3 aB
2,5-5,0	11,5 bA	6,4 bB
5,0-10	7,4 cA	3,8 cB
10-20	3,0 dA	2,3 dB
20-30	1,6 eA	1,3 eA
30-40	0,9 fA	1,0 fA
40-50	0,6 gA	0,7 gA
0-20 <sup>(1)</sup>	6,8 A	4,1 B

Médias seguidas da mesma letra na linha (maiúscula) e na coluna (minúscula) não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

<sup>(1)</sup> média ponderada

No caso do extrator Mehlich I é bem conhecido o seu efeito solubilizador e, portanto, superestimador sobre fontes de P-Ca apatíticas (Feitosa & Raij, 1976; Raij, 1978; Goedert et al., 1991) nas quais se enquadra o FNR utilizado no presente

experimento. Isso se deve ao caráter ácido da extração (pH próximo a 1,2) onde os íons  $H^+$  da solução extratora dissolvem formas estáveis de P-Ca que não são disponíveis para as plantas no curto prazo.

Teoricamente, a utilização da Resina trocadora de íons (Resina) na determinação de P extraível de um solo corrigiria ou minimizaria os problemas de subestimar ou superestimar o disponível (Novais et al., 2007, Sousa et al., 1999a) uma vez que sua dinâmica de extração se assemelha com a absorção pela raiz sendo capaz de acessar apenas o P considerado lábil (Raij, 2004). No entanto, os dados apresentados na Tabela 07 mostram que a Resina possui o mesmo efeito solubilizador e, portanto, superestimador, que o Mehlich I sobre o FNR, de modo que o embasamento teórico consistente que acompanha a Resina desde sua concepção e que a distingue da maioria dos outros métodos, como o Mehlich I (Raij, 2004) parece apresentar limitações quando a fonte de fósforo é FNR.

Na realidade os trabalhos que levaram ao entendimento da Resina como extrator de P com maior sensibilidade e que proporciona melhor relação do teor no solo com parâmetros da planta foram obtidos com fontes de fosfato solúveis ou fontes naturais de baixa reatividade (Raij, 1978; Raij, 1998; Silva e Raij, 1999). Em se tratando de fontes naturais de alta reatividade como os FNRs, a Resina parece proporcionar solubilização elevada, semelhante ao que ocorre com o Mehlich I, caracterizando em superestimação do P extraído, conforme relataram Brasil & Muraoka (1997) e Sousa & Rein (2009). Isto pode estar relacionado à presença da resina catiônica e aniônica adsorvendo, respectivamente,  $Ca^{2+}$  e  $H_2PO_4^{-1}$  da solução, reduzindo temporariamente sua concentração, que seria tamponada pelo FNR não reagido presente no solo, durante as 16 horas de extração sob agitação. Esse efeito seria favorecido pela fase de agitação por 30 minutos com bolas de vidro antes da extração, que pode triturar partículas de FNR facilitando sua posterior dissolução.

No caso do SFT os maiores teores encontrados pela Resina residem, principalmente, na minimização da readsorção de P pela argila durante a extração, fato que ocorre na extração por Mehlich 1 e que leva a adotar para este extrator classes de acordo com o teor de argila para compensar este efeito (Sousa et al., 2004).

Por outro lado, quando o extrator utilizado foi o Bray 1, o solo que foi adubado com SFT apresentou maiores teores de P em relação aquele adubado com FNR. Isso se deve a incapacidade desse extrator solubilizar formas de P-Ca apatíticas, acessando apenas aquilo que já reagiu no solo e encontra-se nas formas de P-Ca mais solúveis

como o fosfato bicálcico ( $\text{CaHPO}_4$ ) e P-Al das argilas (Thomas e Peaslee, 1973), sendo, portanto, mais adequado para qualquer comparação que envolva fertilizantes fosfatados de diferentes naturezas (Raij & Diest, 1980; Kaminski, 1983), como as duas fontes utilizadas no presente trabalho. A especificidade desse extrator a essas formas deve-se à presença do íon fluoreto ( $\text{F}^-$ ) que forma forte complexo com íons  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$  liberando, assim, o P ligado (Raij, 2004; Lins, 1987), sendo inclusive o efeito do fluoreto que justifica os maiores teores de P encontrados nas áreas que receberam SFT em relação com a extração por Mehlich I, uma vez que a complexação do Al impede a readsorção de fosfato nesses sítios.

No que se refere à distribuição de P em profundidade no solo observa-se na Tabela 07 que independente do modo de aplicação e sistema de cultivo adotado, após 14 anos de cultivo, o uso de SFT ou FNR proporcionou diferenças até 20 cm de profundidade. No entanto, como a Tabela 07 corresponde a uma média entre SPC e SPD e o revolvimento do solo afeta tanto a distribuição do P no solo (Nunes et al., 2008) como a solubilização do FNR, por promover maior contato das partículas do fertilizante com o solo (Savant & Chien, 1990), torna-se necessária uma análise separada do comportamento de SFT e FNR para cada um dos sistemas de cultivo, tanto no que se refere à distribuição de P em profundidade (Tabela 08) como em relação aos teores médios na camada de 0-20 cm (Tabela 09).

No que se refere à distribuição em profundidade (Tabela 08) observa-se que no SPC as diferenças entre SFT e FNR, ocorrem até 20 cm, que é a profundidade até onde o fertilizante é incorporado. Por outro lado, no SPD a adubação fosfatada por 14 anos com SFT ou FNR provocou alterações predominantemente nos primeiros 10 cm, profundidade semelhante àquela observada por Santos (2009) comparando a distribuição até 30 cm de profundidade do P extraível por Mehlich I, Bray 1 e Resina em um latossolo cultivado por 8 anos sob SPD e adubado com SFT e FNR no sulco e a lanço. Desta forma, percebe-se que os dados apresentados na Tabela 07, avaliados independente do sistema de cultivo, sofreram forte influência dos valores obtidos no SPC, razão pela qual a interação Fonte x Sist foi significativa (Tabela 06) e merece ser abordada.

Uma vez definido que as duas fontes apresentam distinta distribuição de P no solo até 10 cm, no caso do SPD e até 20 cm, no caso do SPC, avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1, resta definir qual das fontes apresentou maiores teores, e, portanto maior distribuição em profundidade. No entanto, observa-se que quando o P foi

avaliado por Mehlich I e Resina o FNR apresentou os maiores valores, enquanto que quando o extrator foi o Bray 1 o SFT apresentou os maiores valores.

**Tabela 08.** Distribuições do P extraível avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), independente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco).

Sistema	Fonte	Camada (cm)						
		0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50
P Mehlich I (mg dm <sup>-3</sup> )								
SPC	SFT	5,7 aC	5,2 aC	3,3 abC	1,9 bB	0,7 cB	0,4 dA	0,3 dAB
	FNR	9,9 abBC	12,8 aB	6,1 bB	4,3 cA	1,0 dA	0,6 eA	0,4 eA
SPD	SFT	16,4 aB	9,1 bBC	4,8 cBC	1,0 dC	0,7 dB	0,5 dA	0,4 eA
	FNR	110,7 aA	49,0 bA	14,2 cA	0,7 dC	0,5 dB	0,4 dA	0,2 eB
P Resina (mg dm <sup>-3</sup> )								
SPC	SFT	13,7 aC	11,3 aB	8,4 aB	4,7 bB	2,1 cA	1,4 dB	0,9 dB
	FNR	16,7 aC	18,6 aB	8,6 bB	7,3 bA	2,2 cA	1,3 dB	1,3 dAB
SPD	SFT	31,7 aB	18,1 bB	9,3 cB	2,7 dC	2,4 dA	1,8 eA	1,6 eA
	FNR	121,7 aA	90,7 bA	19,5 cA	2,6 dC	1,9 eA	1,2 fB	1,0 fAB
P Bray 1 (mg dm <sup>-3</sup> )								
SPC	SFT	10,2 aC	9,4 aB	6,1 bB	4,1 cA	1,8 dA	0,9 eA	0,7 eA
	FNR	6,7 aC	4,8 abC	3,4 bcC	3,0 cB	1,4 dAB	1,1 dA	0,8 eA
SPD	SFT	22,4 aA	13,6 bA	8,8 cA	2,0 dC	1,4 eAB	0,9 fA	0,6 gA
	FNR	13,8 aB	7,9 bB	4,2 cC	1,5 dC	1,2 dB	0,9 deA	0,7 eA

Médias seguidas da mesma letra na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula) não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

Uma vez que o extrator Bray 1 é o mais adequado para qualquer comparação que envolva fertilizantes fosfatados de diferentes naturezas (Raij & Diest, 1980; Kaminski, 1983), conclui-se que o SFT permitiu maior disponibilidade de P em profundidade. No entanto, vale ressaltar que essa afirmação é válida somente em se tratando do P considerado disponível pela planta já que quando utilizados extratores que acessam formas apatíticas de P, como o Mehlich I e Resina, os teores foram maiores para os tratamentos com FNR. Isso indica que nas camadas de solo dos tratamentos que receberam FNR ainda existe a presença do fertilizante, porém não reagido, pois, conforme analisam Sousa et al. (1999) a reação total do FNR somente ocorrerá quando os teores obtidos por Bray 1 superarem ou igualarem àqueles obtidos por Mehlich I.



**Tabela 09.** Média ponderada até 20 cm dos teores de P avaliados por três extratores em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD) recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) independente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco).

Extratores	Sistema de preparo convencional		Sistema Plantio direto	
	SFT	FNR	SFT	FNR
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----			
Mehlich I	3,1 d	6,5 b	4,9 c	23,9 a
Resina	7,6 c	9,9 b	10,2 b	32,7 a
Bray 1	6,0 b	3,8 c	7,7 a	4,5 c

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

Os menores teores de P observados na média ponderada de 0-20 cm nos solos sob SPC em relação àqueles sob SPD (Tabela 09) são, dentre outros fatores, devido ao efeito de diluição do fertilizante durante o revolvimento do solo a 20 cm de profundidade com o arado de discos (Tabela 08), de modo que ao reagir com uma camada maior de solo proporciona menores teores de P capazes de entrar em equilíbrio com a solução extratora. Assim, uma vez que as duas fontes estão sob esta influência de diluição, o decréscimo nos teores de P do SPD para o SPC deveria ser na mesma proporção caso este fosse o único fator que afetasse. No entanto, a Tabela 09 mostra uma redução dos teores encontrados no SPC em relação ao SPD para o SFT de 37 % e 25 % para Mehlich I e Resina respectivamente, enquanto para o FNR os valores foram 73 % e 70 %.

Isso indica que o SPC, pelo revolvimento provocado pelo arado de discos, permite um maior contato do FNR com o solo, de modo que ele possa reagir de maneira mais intensa nesse sistema em comparação com o SPD, aumentando sua solubilização e apresentando dinâmica no solo mais semelhante ao SFT.

### 3.1.3 Efeito do modo de aplicação do fertilizante fosfatado

A maior parte da área agrícola brasileira ocupada pelas culturas de soja e milho é adubada, no que se refere a P, no sulco de semeadura. Na região do Cerrado existe a recomendação de aplicação da adubação potássica, a depender da dose, espaçamento e capacidade de troca catiônica do solo a lanço antes ou imediatamente após o plantio

(Vilela et al., 2004), sendo comum à adoção dessa prática pelos produtores, que ganham ao evitar efeito salino do KCl nas sementes, bem como praticidade no plantio.

No que se refere ao P, a aplicação do fertilizante a lanço possibilitaria realizar toda a adubação em pré semeadura, de modo que no ato do plantio seria utilizado apenas a semente, no caso da soja, ou semente associado com a dose de nitrogênio de plantio, no caso do milho. Essa alternativa de manejo tornaria o plantio mais prático e eficiente do ponto de vista de uso máquinas, mão de obra e do tempo, sendo este último crucial em regiões como no Mato Grosso, onde as áreas plantadas são muito extensas e as “janelas” de plantio são pequenas.

A literatura apresenta diversos trabalhos realizados no exterior comparando aplicações de P em longa data na superfície e no sulco, quanto à produtividade dos cultivos (Welch et al. 1966; Eckert & Johnson, 1985; Bordoli & Malarino, 1998; Mallarino et al., 1999; Howard et. al, 2002;) e distribuição de P no solo (Eckert & Johnson, 1985; Howard et. al, 1999). No Brasil, essas informações são mais escassas destacando trabalhos no sul do País de Model & Anghinoni (1992), Klepker & Anghinoni (1993) e Costa et al. (2009) sendo que na região do Cerrado os trabalhos são ainda mais escassos destacando-se Yost et al. (1979), Resende et al (2006) e Santos (2009). No entanto, de modo geral, não se encontra na literatura trabalhos de longa duração como os do presente estudo, avaliando distribuição de P em pequenas camadas do solo sob efeito dos modos de aplicação do fertilizante fosfatado associados a diferentes fontes e sistemas de cultivo.

A Tabela 10 corresponde à interação dupla (modo x prof) altamente significativa ( $p < 0,01$ ) mostrada na Tabela 06 apresentando a distribuição de P até 50 cm de profundidade numa comparação entre aplicação a lanço e no sulco de semeadura independente da fonte utilizada e do sistema de preparo (média entre as aplicações de SFT e FNR sob SPC e SPD).

Percebe-se que para os dois modos de aplicação ocorre um decréscimo de distribuição em profundidade sendo que para aplicações a lanço o gradiente é maior do que aquele que ocorre quando o fertilizante é aplicado no sulco de semeadura. Observa-se, portanto, e pelos três extratores utilizados, teores de P muito maiores na camada de 0-2,5 dos tratamentos a lanço em relação ao sulco, que por sua vez apresenta maiores teores na camada de 5,0-10 cm, sendo que a camada de 2,5-5,0 cm apresenta os mesmos teores para os dois modos de aplicação e representa uma fase transitória entre as duas camadas contrastantes (0-2,5 cm e 5,0-10 cm).

**Tabela 10.** Distribuição até 50 cm de P avaliados por três extratores em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados a lanço ou no sulco de semeadura independente da fonte do fertilizante e sistema de preparo (média entre superfosfato triplo e fosfato natural reativo sob sistema de preparo convencional e plantio direto).

Camadas	Modo de aplicação	
	Lanço	Sulco
cm	----- P Mehlich I (mg dm <sup>-3</sup> )-----	
0-2,5	51,4 aA	19,9 aB
2,5-5,0	18,5 bA	19,6 aA
5,0-10	4,5 cB	9,6 bA
10-20	1,8 dA	2,1 cA
20-30	0,7 eA	0,7 dA
30-40	0,5 fA	0,5 eA
40-50	0,3 gA	0,3 fA
0-20 <sup>(1)</sup>	10,8 A	8,4 B
cm	----- P Resina (mg dm <sup>-3</sup> )-----	
0-2,5	62,2 aA	29,7 aB
2,5-5,0	38,2 bA	31,2 aA
5,0-10	9,4 cB	13,5 bA
10-20	4,3 dA	4,3 cA
20-30	2,2 eA	2,1 dA
30-40	1,5 fA	1,4 eA
40-50	1,3 fA	1,1 eA
0-20 <sup>(1)</sup>	17,1 A	13,1 B
cm	----- P Bray 1 (mg dm <sup>-3</sup> )-----	
0-2,5	15,8 aA	10,8 aB
2,5-5,0	9,0 bA	8,9 bA
5,0-10	4,8 cB	6,4 cA
10-20	2,7 dA	2,5 dA
20-30	1,5 eA	1,3 eA
30-40	0,9 fA	0,9 fA
40-50	0,7 gA	0,7 gA
0-20 <sup>(1)</sup>	5,7 A	5,3 A

Médias seguidas da mesma letra na linha (maiúscula) e na coluna (minúscula) não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

<sup>(1)</sup> média ponderada

Um ponto a ser ressaltado é que os maiores teores na camada de 5-10 cm dos solos que receberam aplicações anuais no sulco podem parecer não compensar os maiores teores observados na camada de 0-2,5 cm daqueles que receberam à lanço na avaliação feita por Mehlich I e Resina, uma vez que ao realizar uma média ponderada até 20 cm de profundidade o tratamento a lanço apresenta maiores teores. No entanto, ao avaliar a média ponderada de P por Bray 1 os dois modos de aplicação apresentam

valores semelhantes, indicando que o efeito superestimador do Mehlich I e Resina sobre FNR não reagido é maior no tratamento a lanço do que no sulco de semeadura. Possivelmente a técnica de amostragem empregada permitiu que nas amostras de aplicações a lanço se coletasse maiores quantidades de FNR não reagido do que nas amostras de aplicações no sulco, onde as quatro amostras coletadas na entre-linha podem ter diluído excessivamente aquela coletada exatamente na linha de semeadura.

Ao observar a Tabela 11 percebe-se que esse efeito de maior superestimação nos tratamentos com aplicações de fertilizante fosfatado a lanço, em relação aqueles no sulco, resultando em maiores teores médios na camada de 0-20 cm, ocorre devido à influência dos dados de solo conduzidos sob SPD. Nesse sistema, por não haver revolvimento do solo, como ocorre no SPC, existe acúmulo de FNR não reagido na camada de 0-2,5 cm possibilitando as discrepâncias comentadas anteriormente em função da amostragem.

**Tabela 11.** Média ponderada até 20 cm dos teores de P avaliados por três extratores em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional ou plantio direto recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados a lanço ou no sulco de semeadura independente da fonte do fertilizante (média entre tratamentos que receberam superfosfato triplo e fosfato natural reativo).

Extratores	Sistema de preparo convencional		Sistema Plantio direto	
	Lanço	Sulco	Lanço	Sulco
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----			
Mehlich I	3,9 d	5,8 c	17,7 a	11,1 b
Resina	8,4 c	9,4 c	25,7 a	16,9 b
Bray 1	4,8 c	5,0 bc	6,6 a	5,7 b

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

Uma vez que o revolvimento do solo, por razões óbvias, afeta drasticamente a distribuição do P no solo, é de se esperar que as comparações feitas entre as camadas de solo quanto aos teores de P para os dois modos de aplicação do fertilizante não se apliquem perfeitamente e de maneira igual aos dois sistemas em estudo no presente trabalho. Isso significa dizer que a distribuição do P em profundidade sofre efeito não apenas do modo de aplicação (Tabelas 6 e 10) mas também da interação entre o modo de aplicação do fertilizante e o sistema de cultivo. De fato a Tabela 12 retrata essa interação tripla (modo x sist x prof), que foi apresentada na Tabela 6 como altamente significativa (p < 0,01).

**Tabela 12.** Distribuições do P extraível avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) e plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados a lanço e no sulco de semeadura independente da fonte do fertilizante (média entre tratamentos que receberam superfosfato triplo e fosfato natural reativo).

Sistema	Modo	Camada (cm)						
		0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50
P Mehlich I (mg dm <sup>-3</sup> )								
SPC	Lanço	7,6 aC	4,2 abD	4,0 abB	2,8 bA	0,9 cA	0,5 dA	0,4 dA
	Sulco	7,9 bC	13,8 aC	5,4 bB	3,4 cA	0,9 dA	0,5 eA	0,3 eA
SPD	Lanço	95,2 aA	32,7 bA	5,1 cB	0,8 dB	0,6 dB	0,4 deA	0,3 eA
	Sulco	31,9 aB	25,4 bB	13,9 cA	0,9 dB	0,6 dB	0,5 dA	0,3 eA
P Resina (mg dm <sup>-3</sup> )								
SPC	Lanço	17,1 aC	9,5 abD	8,3 bC	6,0 bA	2,2 cA	1,4 dA	1,2 dA
	Sulco	13,4 abC	20,4 aC	8,7 bBC	5,9 cA	2,1 dA	1,3 eA	0,9 eA
SPD	Lanço	107,4 aA	66,9 bA	10,6 cB	2,6 dB	2,2 dA	1,5 eA	1,3 eA
	Sulco	46,1 aB	42,0 aB	18,2 bA	2,6 cB	2,0 dA	1,5 eA	1,3 eA
P Bray 1 (mg dm <sup>-3</sup> )								
SPC	Lanço	8,2 aC	5,9 abC	4,4 bcB	3,8 cA	1,7 dA	1,0 eA	0,7 fA
	Sulco	8,7 aC	8,3 aB	5,1 bB	3,2 cB	1,4 dA	1,0 eA	0,7 eA
SPD	Lanço	23,3 aA	12,1 bA	5,2 cB	1,7 dC	1,3 eA	0,9 fA	0,7 fA
	Sulco	12,9 aB	9,4 bB	7,8 bA	1,8 cC	1,3 dA	0,9 eA	0,6 fA

Médias seguidas da mesma letra na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula) não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

A primeira observação que se faz a respeito do efeito do modo de aplicação do fertilizante fosfatado e do sistema de cultivo na distribuição de P no solo é a de que no SPC não há um gradiente expressivo de decréscimo de P para os dois modos de aplicação, fato que ocorreu no SPD. Assim, percebe-se que os dados observados na Tabela 10 foram fortemente influenciados pelo SPD, uma vez que foram obtidos com uma média para os dois sistemas (SPC e SPD) e para as duas fontes (SFT e FNR) utilizadas neste trabalho, sendo suas observações válidas apenas para este sistema.

Resultado semelhante foi obtido por Rheinheimer e Anghinoni (2001), avaliando três camadas (0-2,5 cm, 2,5-7,5 cm e 7,5-15 cm), de um Latossolo Vermelho distrófico típico cultivado por 15 anos sob SPD e SPC. Esses autores observaram um elevado gradiente de P entre as camadas do solo sob SPD enquanto que nas camadas do solo sob SPC havia uma distribuição uniforme deste nutriente, avaliado por Mehlich I e Resina.

Desta forma, no SPC, observa-se uma distribuição de P semelhante para os dois modos de aplicação do fertilizante fosfatado, em virtude da homogeneização proporcionada a cada revolvimento anual do arado de discos, havendo uma única

diferença na camada 2,5-5 cm do tratamento no sulco, que apresentou maiores teores de P em relação à camada de 0-2,5 e maiores teores de P em relação à camada de 2,5-5 do tratamento à lanço (Tabela 12). Isso se deve ao efeito da adubação da safra agrícola de 2007/2008 uma vez que no momento da amostragem a área ainda não havia sido preparada para a safra seguinte. Havia, portanto presença de P reagido de SFT e FNR mas não redistribuído pela planta ou de P não reagido de FNR e em menor proporção de SFT, cuja possibilidade foi observada por Sousa (1980).

As camadas abaixo de 20 cm (20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm) no SPC apresentaram teores de P, em comparação com aqueles obtidos em área nativa, ou semelhantes ou estatisticamente diferentes porém com diferença menor do que  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (Tabela 12), o que pode ser considerado abaixo do limite de detecção analítica. Isso indica que mesmo após 14 anos de cultivo e com  $1120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  incorporados a 20 cm, o P se limita até esta camada, independente do modo de aplicação ou fonte de adubo fosfatado.

No SPD os teores de P da camada 0-2,5 cm representam o acúmulo proporcionado pela decomposição de resíduos vegetais depositados ao longo dos 14 anos de cultivo, sendo que no tratamento a lanço esse efeito se soma à própria adubação feita nessa camada. Desta forma, para a camada de 0-2,5 cm os teores de P avaliados respectivamente por Mehlich I, Resina e Bray-1 são 198 % 133 % e 80 % maiores no tratamento a lanço do que aqueles obtidos no sulco (Tabela 12), sendo que a elevada relação avaliada por Mehlich I é resultante da solubilização de FNR não reagido, conforme já comentado.

Avaliando a distribuição de P nas camadas de solo até 10 cm de profundidade do SPD (Tabela 12), a partir da superfície, a camada de 2,5-5 cm representa uma região de início de inversão dos efeitos dos modos de aplicação, uma vez que nessa camada, apesar de ainda inferiores estatisticamente, os teores de P dos tratamentos de adubação no sulco se aproximam daqueles observados nos tratamentos à lanço, se tornando superiores na camada seguinte.

Na camada de 5-10 cm do SPD e para adubação a lanço os teores de P representam o acúmulo proporcionado ao longo de 14 anos pela decomposição nessa camada de resíduos de raízes de soja, milho e milheto que utilizaram para o seu desenvolvimento o P do fertilizante aplicado na camada 0-2,5 cm. Além disso a pequena mobilização por ocasião da sulcagem nos plantios de soja, milho e milheto a 50 cm, 80 cm e 20 cm de espaçamento respectivamente, pode resultar numa movimentação

de solo da camada 0-2,5 cm para camadas mais profundas. No caso da adubação no sulco os teores de P na camada de 5-10 cm do SPD representam o acúmulo proporcionado pela manutenção do adubo na região em que ele foi aplicado (5-8 cm de profundidade) ao longo dos 14 anos de cultivo. Desta forma, para a camada de 5-10 cm os teores de P avaliados por Mehlich I, Resina e Bray-1 respectivamente são 172 %, 72 % e 50 % maiores no tratamento no sulco do que aqueles obtidos à lanço (Tabela 12), sendo que a elevada relação avaliada por Mehlich I é resultante da solubilização de FNR não reagido.

Os maiores teores de P no SPD na camada de 0-2,5 cm em relação à camada de 5-10 cm nos tratamentos que receberam adubação no sulco diferem de trabalhos na mesma temática (Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Nunes et al., 2008; Santos, 2009). No entanto, isso se justifica pelo fato de ao longo dos 14 anos de cultivo terem sido devolvidos ao solo pela palhada de soja, milho e milheto cerca de 234 e 202 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, para os tratamentos com SFT e FNR respectivamente (considerando produção acumulada de grãos de 66.511 kg ha<sup>-1</sup> para SFT e 58.755 kg ha<sup>-1</sup> para FNR e exportação média de 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por tonelada de grãos de soja e milho colhidos e produção de matéria seca de milheto de 58.296 kg ha<sup>-1</sup> para SFT e 49.018 kg ha<sup>-1</sup> para FNR e teor médio de 2 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por tonelada de matéria seca). Desta forma, após 14 anos de cultivos, de um total acumulado no solo (obtido pela subtração entre o total adicionado pelo fertilizante e o total exportado pelos grãos) de 455 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 532 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para SFT e FNR, respectivamente, 51 % e 38 % foram adicionados na superfície do solo pela reciclagem das plantas cultivadas, indicando que existe uma elevada capacidade de redistribuição do P localizado no sulco, mesmo para fontes de baixa solubilidade em água, como o FNR e em condições de não revolvimento do solo, como no SPD.

Da mesma forma os maiores teores de P na camada de 2,5-5 cm do tratamento que recebeu adubação a lanço em relação àquele que recebeu adubação no sulco no SPD indica uma elevada capacidade de redistribuição do P aplicado na superfície do solo. Por fim, esse efeito também é verificado na comparação dos teores de P na camada 5-10 cm do tratamento que recebeu adubação a lanço (5,1, 10,6 e 5,2 para Mehlich I, Resina e Bray 1, respectivamente) em relação à área nativa do cerrado (0,8, 2,7 e 1,4 Mehlich I, Resina e Bray 1, respectivamente -Tabela 13), uma vez que a área não foi corrigida com P antes da implantação do experimento.

As camadas abaixo de 10 cm (10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm e 40-50 cm) no SPD apresentaram teores de P, em comparação com aqueles obtidos em área nativa ou

semelhantes ou estatisticamente diferentes porém com diferença menor do que  $1 \text{ mg dm}^{-3}$  de P, o que pode ser considerado abaixo do limite de detecção analítica. Isso indica que mesmo após 14 anos de cultivo e com  $1120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicados, o P se limita até 10 cm de profundidade, independente do modo de aplicação ou fonte do fertilizante fosfatado. Possivelmente esteja no solo como residual da adubação fosfatada em torno da metade da quantidade aplicada, pois a outra parte foi exportada pelos grãos de soja e milho, considerando que  $1 \text{ t ha}^{-1}$  de grãos de soja ou milho exportem  $10 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Mesmo assim  $560 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  que ficaram no solo como residual é o dobro do que se recomenda como adubação corretiva.

### **3.1.4 Efeito do sistema de cultivo**

Os sistemas de cultivo após 14 anos alteraram a distribuição de P no perfil do solo em relação à condição original de cerrado, independentemente da fonte e modo de aplicação do fertilizante fosfatado (média entre tratamentos que receberam SFT e FNR aplicados a lanço e no sulco), até 20 cm de profundidade no SPC e até 10 cm de profundidade no SPD (Tabela 13).

Os teores de P nas camadas de 0-2,5 cm, 2,5-5 cm e 5-10 cm no SPD apresentam-se muito superiores aos encontrados no SPC nessas mesmas camadas, compreendendo valores de 2,0 a 8,2 vezes para Mehlich I, 1,7 a 5,0 para a resina e 1,4 a 2,1 para Bray 1. Resultados semelhantes foram obtidos por Hargrove et al. (1982), Follet & Peterson (1988), Edward et al. (1992), Selles et al. (1997), Bravo et al. (2007), Nunes et al. (2008), Costa et al. (2009) e Santos (2009) em experimentos com 5 a 18 anos de condução. No entanto, Duiker & Beegle (2006) observaram diferenças nos teores de P sob SPD em comparação com SPC apenas nos 5 cm superficiais, mesmo após 25 anos de condução do experimento.

Por outro lado, na camada de 10-20 cm, os teores de P no SPC são da ordem de 1,5, 2,3 e 2,0 vezes maiores que os obtidos no SPD para Mehlich I, Resina e Bray 1, respectivamente.



**Tabela 13.** Distribuição até 50 cm de profundidade do P extraível avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1, em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos em sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, independente da fonte e modo de aplicação (média entre os tratamentos que receberam fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados a lanço e no sulco), tendo o cerrado nativo como referência.

Camada	Sistema		
	Cerrado	SPC	SPD
----- P Mehlich I (mg dm <sup>-3</sup> ) -----			
0-2,5	1,6 aC	7,8 aB	63,6 aA
2,5-5	1,0 aC	9,0 aB	29,0 bA
5-10	0,8 aC	4,7 bB	9,5 cA
10-20	0,7 aB	3,1 cA	0,9 dB
20-30	0,5 aA	0,9 dA	0,6 dA
30-40	0,4 aA	0,5 dA	0,5 dA
40-50	0,4 aA	0,4 dA	0,3 dA
----- P Resina (mg dm <sup>-3</sup> ) -----			
0-2,5	3,5 abC	15,2 aB	76,7 aA
2,5-5	3,7 aC	14,9 aB	54,4 bA
5-10	2,7 abcC	8,5 bB	14,4 cA
10-20	2,7 abcB	6,0 cA	2,6 dB
20-30	2,1 abcA	2,2 dA	2,1 eA
30-40	1,5 cA	1,4 eA	1,5 fA
40-50	1,6 bcA	1,1 eA	1,3 fA
----- P Bray 1 (mg dm <sup>-3</sup> ) -----			
0-2,5	3,1 aC	8,4 aB	18,1 aA
2,5-5	2,0 bC	7,1 bB	10,8 bA
5-10	1,4 bcC	4,7 cB	6,5 cA
10-20	1,2 bB	3,5 dA	1,7 dB
20-30	0,9 cA	1,6 eA	1,3 deA
30-40	1,0 cA	1,0 efA	0,9 eA
40-50	0,7 cA	0,7 fA	0,7 eA

Médias seguidas da mesma letra na linha (maiúscula) e na coluna (minúscula) não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

Esse efeito, apesar de estar sendo discutido independente da fonte e modo de aplicação do fertilizante fosfatado, ou seja, com base na interação dupla sist x prof, que foi altamente significativa (Tabela 06), também foi observado nas interações em que esses fatores foram analisados (Tabela 08 e Tabela 12). No entanto, na camada onde o teor de P extraível é maior no SPC, quando a fonte utilizada foi o SFT (Tabela 08), este ainda se encontra na faixa considerada muito baixa de acordo com interpretações da região (Sousa et al., 2004) que consideram as produções relativas 0 a 40 %, 41 a 60 %, 61 a 80 %, 81 a 100 %.

61 a 80 %, 81 a 90 % e maior que 90 % como faixas muito baixa, baixa, media, adequada e alta, respectivamente.

Avaliando uma média ponderada na camada de 0-10 do SPD (Tabela 08), os teores de P extraível por Mehlich I para os tratamentos com SFT encontram-se na faixa considerada alta para a região (8,8 mg dm<sup>-3</sup>). Enquanto isso, no SPC, a média ponderada na camada de 0-10 cm dos teores de P extraível por Mehlich I para os tratamentos com SFT encontram-se na faixa considerada adequada para a região (4,4 mg dm<sup>-3</sup>), sendo que em ambos os tratamentos (SPD e SPC adubados com SFT) os teores da camada de 10-20 cm encontram-se na faixa considerada muito baixa.

Desta forma, a média ponderada de 0-20 cm no SPC adubado com SFT apresenta teores de P extraível por Mehlich I de 3,1 mg dm<sup>-3</sup>, enquanto no SPD, para os mesmos tratamentos, o teor médio foi de 4,9 mg dm<sup>-3</sup>, ou seja, 56 % maior (Tabela 08). A Tabela 14 apresenta o estoque de P extraível na camada de 0-20 cm dos tratamentos adubados com SFT e FNR sob SPC e SPD, e demonstra essa mesma informação.

**Tabela 14.** Estoque até 20 cm de profundidade de P extraível em um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional ou sistema plantio direto recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR), independente do modo de aplicação (média entre tratamentos com aplicações a lanço e no sulco).

Extratores	Sistema de preparo convencional		Sistema Plantio direto <sup>(1)</sup>	
	SFT	FNR	SFT	FNR
	----- kg ha <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----			
Mehlich I	14 d	30 b	22 c (54)	108 a (262)
Resina	35 c	47 b	45 b (29)	148 a (217)
Bray 1	28 b	17 c	35 a (27)	21 c (19)

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P<0,05)

<sup>(1)</sup> – Valores entre parênteses representam o aumento, em percentagem, do SPD em relação ao mesmo tratamento sob SPC.

Percebe-se no SPD uma maior capacidade em manter extraível o P adicionado pelo fertilizante. Isso se torna ainda mais evidente ao considerar que, no solo adubado com SFT, e independente do modo de aplicação, existe cerca de 42 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> a menos no solo cultivado sob SPD em relação aquele sob SPC em virtude das maiores produtividades obtidas no SPD ao longo dos 14 anos (62.551 kg ha<sup>-1</sup> e 66.735 kg ha<sup>-1</sup> no SPC e SPD, respectivamente e considerando exportação média de 10 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por tonelada de grão colhido).

Diversas são as justificativas para os maiores teores de P no SPD em relação ao SPC sendo as mais evidentes a menor passagem do P do fertilizante para formas adsorvidas de elevada estabilidade (Sousa e Volkweis, 1987) e os maiores teores de matéria orgânica no solo, como será demonstrado mais à frente no item 3.3 que de diversas formas (Goedert & Oliveira, 2008) atua aumentando a disponibilidade de P no solo.

### **3.2 Distribuição do P no solo e rendimento de grãos**

Apesar de outros fatores influenciarem, a distribuição do P no solo é afetada principalmente pelo sistema de cultivo, fonte do fertilizante fosfatado e seu modo de aplicação (Anghinoni, 2004), conforme pode ser confirmado pela interação significativa ( $P < 0,01$ ) entre esses fatores observada no presente trabalho (Tabela 06)

As distribuições do P extraível em camadas de solo até 50 cm de profundidade de um Latossolo vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob SPC e SPD, recebendo  $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de SFT e FNR aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura são apresentadas nas Tabelas 15, 16 e 17 para Mehlich I, Resina e Bray 1, respectivamente. Os dados contidos em cada uma das tabelas correspondem à interação quádrupla apresentada anteriormente como altamente significativa ( $p < 0,01$ ) (Tabela 6) e demonstram a infinidades de observações possíveis e inclusive a dificuldade de discutir os dados olhando apenas essa interação. Desta forma, toda a discussão feita até aqui procurou explicar os principais efeitos encontrados, isolando a cada momento um ou mais fatores para melhor compreensão e maior certeza da informação. Ainda assim, ao observar os dados tais quais apresentados nas Tabelas 15, 16 e 17 percebe-se que as discussões foram coerentes e conseguiram responder aos questionamentos gerados quanto ao efeito de sistemas de cultivo, fonte do fertilizante fosfatado e modo de aplicação na distribuição de P no solo.

**Tabela 15.** Distribuições do P extraível por Mehlich I em camadas de solo até 50 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura.

Sistema	Fonte	Modo	Camada (cm)						
			0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50
			----- P Mehlich I (mg dm <sup>-3</sup> ) -----						
SPC	SFT	Lanço	5,6 a	3,7 a	3,0 a	2,1 a	0,8 b	0,4 c	0,2 c
		Sulco	5,7 ab	6,6 a	3,7 ab	1,7 b	0,7 c	0,4 d	0,3 d
	FNR	Lanço	9,6 a	4,8 a	5,1 a	3,5 a	0,9 b	0,6 c	0,5 c
		Sulco	10,1 ab	20,9 a	7,2 b	5,1 b	1,0 c	0,6 d	0,4 d
SPD	SFT	Lanço	22,4 a	9,0 b	3,4 c	0,9 d	0,7 d	0,5 de	0,4 e
		Sulco	10,5 a	9,3 ab	6,1 b	1,1 c	0,7 c	0,5 cd	0,4 d
	FNR	Lanço	168,1 a	56,5 b	6,7 c	0,7 d	0,5 d	0,4 d	0,3 d
		Sulco	53,3 a	41,5 b	21,6 c	0,7 d	0,5 d	0,5 d	0,2 e
DMS (5%)			9,3	6,2	2,2	1,2	0,3	0,3	0,2

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05). Para comparação de médias nas colunas foi calculado o DMS a 5%.

**Tabela 16.** Distribuições do P extraível por Resina em camadas de solo até 50 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura.

Sistema	Fonte	Modo	Camada (cm)						
			0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50
			----- P Resina (mg dm <sup>-3</sup> ) -----						
SPC	SFT	Lanço	13,6 a	8,3 a	7,5 a	5,2 b	1,9 c	1,5 cd	0,8 d
		Sulco	13,9 a	14,2 a	9,2 a	4,1 b	2,4 c	1,2 d	0,9 d
	FNR	Lanço	20,6 a	10,6 ab	9,0 b	6,8 c	2,5 d	1,3 e	1,7 e
		Sulco	12,8 b	26,6 a	8,2 b	7,7 b	1,9 c	1,3 cd	0,9 d
SPD	SFT	Lanço	43,7 a	18,8 b	6,6 c	2,4 d	2,5 d	1,9 de	1,5 e
		Sulco	19,7 a	17,4 a	12,0 a	2,9 b	2,2 bc	1,7 c	1,7c
	FNR	Lanço	171,0 a	115,0 b	14,6 c	2,8 d	1,9 e	1,1 f	1,1 f
		Sulco	72,5 a	66,5 a	24,4 b	2,4 c	1,8 cd	1,3 de	0,9 e
DMS (5%)			12,7	12,0	2,9	0,8	0,8	0,6	0,9

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05); Para comparação de médias nas colunas foi calculado o DMS a 5%.

**Tabela 17.** Distribuições do P extraível por Bray 1 em camadas de solo até 50 cm de profundidade em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura.

Sistema	Fonte	Modo	Camada (cm)						
			0-2,5	2,5-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-50
			----- P Bray 1 (mg dm <sup>-3</sup> ) -----						
SPC	SFT	Lanço	9,4 a	6,8 ab	5,2 bc	4,5 c	2,1 d	0,9 e	0,7 e
		Sulco	10,9 a	12 a	6,9 b	3,6 c	1,5 d	0,9 e	0,6 e
	FNR	Lanço	7,0 a	4,9 ab	3,5 ab	3,1 b	1,4 c	1,1 c	0,7 d
		Sulco	6,4 a	4,6 ab	3,2 b	2,8 b	1,3 c	1,0 c	0,8 c
SPD	SFT	Lanço	30,9 a	14,5 b	6,1 c	1,8 d	1,4 d	0,8 e	0,6 e
		Sulco	14,0 a	12,7 a	11,5 a	2,1 b	1,4 c	0,9 cd	0,6 d
	FNR	Lanço	15,8 a	9,7 b	4,3 c	1,6 d	1,2 de	0,9 e	0,7 e
		Sulco	11,8 a	6,2 b	4,1 b	1,5 c	1,1 cd	0,8 de	0,6 e
DMS (5%)			4,7	3,0	1,5	0,4	0,7	0,4	0,3

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05); Para comparação de médias nas colunas foi calculado o DMS a 5%.

Utilizando os dados da distribuição de P apresentados nas Tabelas 15 e 17, foram calculados os estoque de P, em kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e as participações percentuais de cada camada no estoque de P extraível até 30 cm de profundidade avaliado por Mehlich I (Tabela 18) e Bray 1 (Tabela 19), ressaltando que a resina apresentou valores muito semelhantes ao Mehlich I.

**Tabela 18.** Estoque de P extraível avaliado por Mehlich I em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura.

Sistema	Fonte	Modo	Estoque de P extraível por Mehlich I em cada camada de solo <sup>(1)</sup>						
			0-5	5-10	10-20	0-10	0-20	0-30	
			----- kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> -----						
SPC	SFT	Lanço	5,2 <b>(34)</b>	3,4 <b>(22)</b>	4,9 <b>(32)</b>	8,6 <b>(56)</b>	13,5 <b>(88)</b>	15,4 <b>(100)</b>	
		Sulco	6,9 <b>(41)</b>	4,2 <b>(25)</b>	3,9 <b>(23)</b>	11,1 <b>(66)</b>	15,0 <b>(90)</b>	16,8 <b>(100)</b>	
	FNR	Lanço	8,1 <b>(33)</b>	5,7 <b>(24)</b>	8,1 <b>(34)</b>	13,8 <b>(57)</b>	21,9 <b>(91)</b>	24,2 <b>(100)</b>	
		Sulco	17,4 <b>(44)</b>	8,1 <b>(20)</b>	12,0 <b>(30)</b>	25,8 <b>(64)</b>	37,5 <b>(94)</b>	39,9 <b>(100)</b>	
	SPD	SFT	Lanço	16,5 <b>(68)</b>	3,9 <b>(16)</b>	2,1 <b>(9)</b>	20,4 <b>(85)</b>	22,5 <b>(93)</b>	24,1 <b>(100)</b>
			Sulco	10,4 <b>(48)</b>	6,9 <b>(32)</b>	2,5 <b>(12)</b>	17,3 <b>(81)</b>	19,8 <b>(92)</b>	21,5 <b>(100)</b>
FNR		Lanço	118,3 <b>(92)</b>	7,7 <b>(6)</b>	1,7 <b>(1)</b>	126,0 <b>(98)</b>	127,7 <b>(99)</b>	129,0 <b>(100)</b>	
		Sulco	50,0 <b>(64)</b>	24,8 <b>(32)</b>	1,7 <b>(2)</b>	74,7 <b>(96)</b>	76,4 <b>(98)</b>	77,6 <b>(100)</b>	
DMS <sup>(2)</sup>			6,0	2,6	2,6	7,7	7,3	7,4	

<sup>(1)</sup> Valores entre parênteses representam as quantidades relativas de P extraível por Mehlich I, expressas em porcentagem, em cada camada de solo, tendo como referência o total extraído até 30 cm de profundidade.

<sup>(2)</sup> DMS representa a diferença mínima significativa (P<0,05) para cada coluna.

Observa-se uma elevada estratificação do P no SPD, que apresenta até 10 cm de profundidade, independente da fonte analisada (média para as duas fontes), 92 % e 78 % do P encontrado até 30 cm avaliado por Mehlich I e Bray 1 respectivamente, para os tratamentos com aplicação a lanço sendo que 69 % e 58 % (Mehlich I e Bray 1, respectivamente) encontram-se concentrados até 5 cm. Para os tratamentos no sulco, e independente da fonte analisada (média para as duas fontes), 95 % e 89 % do P existente até 30 cm avaliado por Mehlich I e Bray 1 respectivamente, encontram-se até 10 cm de profundidade, sendo que 56 % e 44 % (Mehlich I e Bray 1, respectivamente) encontram-se concentrados até 5 cm.

**Tabela 19.** Estoque de P extraível avaliado por Bray 1 em um Latossolo Vermelho muito argiloso após 14 anos de cultivo sob sistema de preparo convencional (SPC) ou plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como superfosfato triplo (SFT) ou fosfato natural reativo (FNR) aplicados a lanço na superfície ou no sulco de semeadura.

Sistema	Fonte	Modo	Estoque de P extraível por Bray 1 em cada camada de solo <sup>(1)</sup>						
			0-5	5-10	10-20	0-10	0-20	0-30	
			----- kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ha <sup>-1</sup> -----						
SPC	SFT	Lanço	9,1 <b>(30)</b>	5,9 <b>(19)</b>	10,6 <b>(34)</b>	15,1 <b>(49)</b>	25,6 <b>(84)</b>	30,6 <b>(100)</b>	
		Sulco	12,9 <b>(39)</b>	7,8 <b>(24)</b>	8,4 <b>(26)</b>	20,7 <b>(63)</b>	29,1 <b>(89)</b>	32,8 <b>(100)</b>	
	FNR	Lanço	6,7 <b>(31)</b>	4,0 <b>(19)</b>	7,2 <b>(34)</b>	10,7 <b>(50)</b>	17,9 <b>(84)</b>	21,3 <b>(100)</b>	
		Sulco	6,2 <b>(31)</b>	3,7 <b>(19)</b>	6,6 <b>(34)</b>	9,9 <b>(50)</b>	16,5 <b>(84)</b>	19,7 <b>(100)</b>	
	SPD	SFT	Lanço	23,9 <b>(62)</b>	7,0 <b>(18)</b>	4,2 <b>(11)</b>	30,9 <b>(81)</b>	35,1 <b>(92)</b>	38,3 <b>(100)</b>
			Sulco	14,1 <b>(40)</b>	13,2 <b>(37)</b>	5,0 <b>(14)</b>	27,3 <b>(77)</b>	32,3 <b>(91)</b>	35,4 <b>(100)</b>
FNR		Lanço	13,4 <b>(54)</b>	4,9 <b>(20)</b>	3,7 <b>(15)</b>	18,3 <b>(74)</b>	22,0 <b>(88)</b>	24,9 <b>(100)</b>	
		Sulco	9,5 <b>(47)</b>	4,7 <b>(23)</b>	3,5 <b>(17)</b>	14,2 <b>(70)</b>	17,7 <b>(87)</b>	20,4 <b>(100)</b>	
DMS <sup>(2)</sup>			3,9	1,6	0,8	4,6	5,0	5,1	

<sup>(1)</sup> Valores entre parênteses representam as quantidades relativas de P extraível por Bray 1, expressas em percentagem, em cada camada de solo, tendo como referência o total extraído até 30 cm de profundidade.

<sup>(2)</sup> DMS representa a diferença mínima significativa (P<0,05) para cada coluna.

Resultados semelhantes foram obtidos por Santos (2009) que, comparando a distribuição até 30 cm de profundidade do P extraível em um Latossolo cultivado por 8 anos sob SPD e adubado com SFT e FNR no sulco e a lanço observaram 70 % do P avaliado por Bray 1, contido nos primeiros 10 cm, tanto para os tratamentos a lanço como no sulco.

No SPC apenas 57 % e 50 % do P encontrado até 30 cm avaliado por Mehlich I e Bray 1 respectivamente, para os tratamentos com aplicação a lanço e independente da fonte analisada (média para as duas fontes) encontram-se até 10 cm de profundidade, sendo 34 % 31 % (Mehlich I e Bray 1, respectivamente) encontrados até 5 cm e indicando um maior volume de solo fertilizado em comparação com o SPD.

No entanto, apesar da alta estratificação de P nas camadas superficiais do solo (pequeno volume de solo fertilizado, mas com altas concentrações de P extraível) no SPD, principalmente para aplicações a lanço, os rendimentos obtidos pela soja cultivada na safra que antecedeu a amostragem do solo são considerados adequados (Tabela 20) em relação ao potencial produtivo dessa cultura na região do Cerrado, não havendo diferenças de produtividade, dentro de cada sistema, entre os tratamentos variando modo e fonte. Isso evidencia que, apesar do desenvolvimento radicular e absorção de P pelas plantas aumentar com o volume de solo adubado (Ball-Coelho et al., 1998; Costa et al., 2009), estas possuem mecanismos de compensação morfológicos (Anghinoni & Barber, 1980) e fisiológicos (Edwards & Barber, 1976; Jungk & Barber, 1974) que podem compensar excessivas localizações de P, como as observadas nos solos sob SPD neste trabalho, e assim, absorver a quantidade necessária ao satisfatório desenvolvimento vegetativo e produção de grãos.

**Tabela 20.** Rendimentos de soja no 14<sup>o</sup> cultivo em função de duas fontes de fósforo, dois modos de aplicação do fertilizante no solo, na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, em SPC e SPD.

Sistema	Fonte de fósforo	Modo de aplicação	Rendimento de grãos de soja no 14 <sup>o</sup> cultivo <sup>(1)</sup>
			---- kg ha <sup>-1</sup> ---
Sistema de preparo convencional	Superfosfato triplo	lanço	3.369 d
	Superfosfato triplo	sulco	3.498 cd
	Fosfato natural reativo	lanço	3.657 bcd
	Fosfato natural reativo	sulco	3.442 cd
	média		3.492 B
Sistema plantio direto	Superfosfato triplo	lanço	4.196 a
	Superfosfato triplo	sulco	4.054 ab
	Fosfato natural reativo	lanço	3.848 abc
	Fosfato natural reativo	sulco	4.042 ab
	média		4.035 A
	CV		9,68

Médias seguidas da mesma letra para cada tratamento (minúscula) e para as médias (maiúscula) não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05).

<sup>(1)</sup> O rendimento de grãos do tratamento sem P no SPC foi de 82 kg ha<sup>-1</sup>.

Outro aspecto interessante reside na comparação das produtividades dos dois sistemas de cultivo, onde o SPD apresentou, para a média dos quatro tratamentos (SFT



e FNR, a lanço e no sulco), 15,5 % (543 kg ha<sup>-1</sup>) de soja a mais do que o SPC no 14º ano de cultivo.

Apesar dos diversos benefícios do SPD em relação ao SPC descritos na literatura como a melhor dinâmica de água (Costa et al. 2003) e estruturação do solo (Bertol et al. 2004), maior atividade biológica (Mendes et al. 2003) e dinâmica de nutrientes (Santos & Tamm, 2003), os dados apresentados no item 3.1.4 através das Tabela 13 e 14 sugerem que, como importante modulador da produção vegetal, os maiores teores de P no SPD sejam os responsáveis por essas maiores produtividades obtidas.

De fato isso foi observado pela regressão linear altamente significativa ( $P < 0,01$ ) entre teor de P extraível por Bray-1 acumulado no solo (x), proveniente da adubação fosfatada ao longo dos 14 anos de cultivo, e o rendimento de soja no 14º cultivo (Y), sendo que conforme mostrado na Tabela 19, as camadas de 0-10 cm nos tratamentos sob SPD e 0-20 cm nos tratamentos sob SPC correspondem àquelas onde o fertilizante reagiu. Nesta regressão ( $Y = 64,074x + 3271,1$ ), foram utilizados 24 pares (4 tratamentos sob SPD avaliando o P extraível por Bray-1 até 10 cm e 4 tratamentos sob SPC avaliando o P extraível por Bray-1 até 20 cm, ambos com 3 repetições) resultando em um  $r^2$  de 0,46, significativo a 5%. A escolha do extrator Bray-1 pra realização desta regressão reside no fato de ser o único que permite comparações envolvendo as duas fontes utilizadas neste trabalho, conforme comentado anteriormente.

### **3.3 Distribuição de matéria orgânica do solo e relações com o P no solo**

Um dos principais atributos do solo que é afetado pelo sistema de cultivo e influencia na disponibilidade do P é a matéria orgânica do solo (MOS). Sousa et al. (1997) apresentam duas áreas que, inicialmente homogêneas, foram cultivadas por 13 anos, sendo uma com cultivos anuais (soja por 10 anos, milho no 11º e 12º ano, soja no 13º ano) sob SPC e outra com uma seqüência de cultivos anuais e pastagem (soja sob SPC nos dois primeiros anos, nove anos de pastagem e mais dois anos com soja sob SPC). No 13º ano de cultivo foram comparadas as produções de soja, teores de P no solo e teores de matéria orgânica das duas áreas. Esses autores observaram que na área que recebeu pastagem as produtividades da soja foram superiores em relação àquela que recebeu apenas cultivos anuais, para um mesmo teor de P no solo. Como exemplo, para produzir 3 t ha<sup>-1</sup> de soja, na área com cultivos anuais, foi necessário ter no solo 6 mg dm<sup>-3</sup> de P, enquanto na área que recebeu pastagem por nove anos este valor foi de 3 mg

dm<sup>-3</sup>, ou seja, a metade, evidenciando maior eficiência do uso de P quando da presença da pastagem. Uma das justificativas foram os maiores teores de matéria orgânica proporcionado pela pastagem.

Diversos autores apontam os benefícios do SPD em acumular MOS em relação ao SPC (Bayer et al., 1995; Bayer & Mielniczuk, 1997; Hernani et al, 1999; Bayer et al. 2000a, 2000b, 2000c; Balesdent et al., 2000; Costa et al. 2008; Nunes et al., 2008), principalmente pela manutenção da estrutura do solo, reduzindo a exposição da MOS ao ataque microbiano. A Tabela 21 apresenta uma comparação entre os estoques de MOS nos dois sistemas.

**Tabela 21.** Estoque de matéria orgânica do solo em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em duas fontes de fósforo (fosfato natural reativo e superfosfato triplo) e dois modos de aplicação (sulco e lanço) (média entre fontes e modos para o mesmo tratamento).

Camadas	Sistema de cultivo	
	Sistema de preparo convencional	Sistema plantio direto
cm	----- Matéria orgânica do solo (t ha <sup>-1</sup> ) -----	
0-10	30,7 b	35,7 a
10-20	28,2 a	24,2 b
0-20	58,9 a	59,9 a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

Observa-se que o SPD proporciona acúmulo de MOS na camada de 0-10 cm em relação ao SPC, que por sua vez apresenta maior acúmulo na camada de 10-20 cm. Isso se deve ao não revolvimento do solo sob SPD, permitindo a manutenção do material morto na superfície do solo de modo que há um grande aporte do material vegetal nas camadas superficiais. No SPC o material vegetal é deslocado para a camada inferior (10-20 cm) por efeito do revolvimento do arado, razão pela qual existe acúmulo de MOS nesta camada.

Desta forma, ao avaliar os estoques de MOS na camada de 0-20 cm de profundidade, observa-se que os dois sistemas apresentam a mesma quantidade acumulada. Essa informação contrasta com dados da literatura citados anteriormente e possivelmente se deve ao tipo de SPC do presente estudo, composto de apenas uma aração com arado de discos e uma gradagem niveladora, sempre feitas imediatamente antes do plantio e em condição ideal de água no solo, com uso de plantas de cobertura e

com altos rendimentos dos cultivos de soja (média para 11 cultivos de 2.738 kg ha<sup>-1</sup>) e milho (média para 3 cultivos de 10.621 kg ha<sup>-1</sup>), resultando numa condição distinta dos demais trabalhos com SPC onde, usualmente são realizadas duas gradagens aradoras (uma após a colheita da cultura e outra antes do plantio da safra seguinte) e sem uso de plantas de cobertura e rotação de culturas.

Apesar dos dois sistemas apresentarem a mesma quantidade de MOS acumulada até 20 cm de profundidade a distribuição entre eles é muito distinta. A Tabela 22 retrata a distribuição da MOS até 50 cm de profundidade em função dos sistemas de cultivo e independente da fonte e modo de aplicação do fertilizante fosfatado, tendo o cerrado nativo como uma referência.

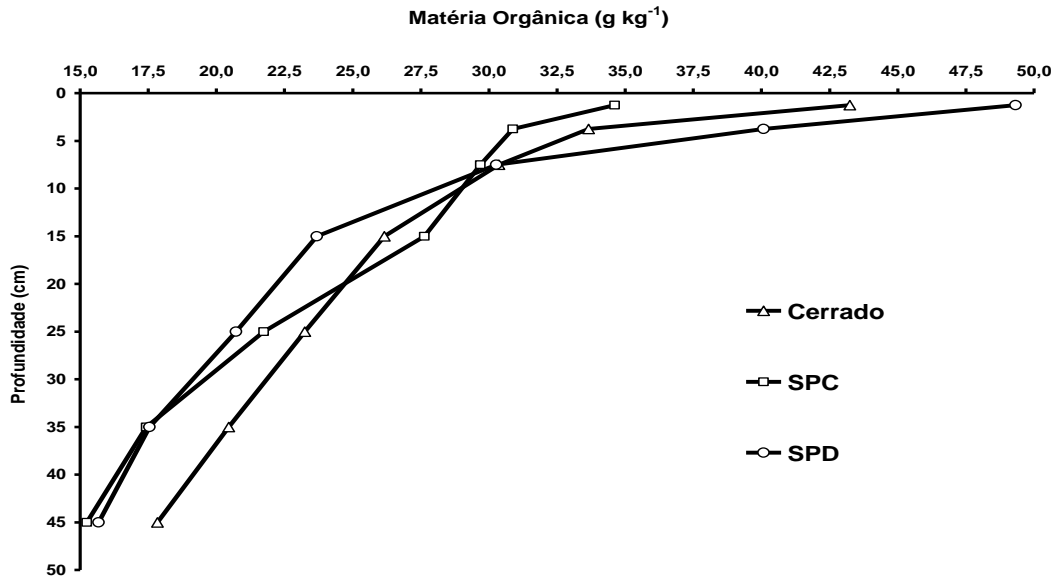
**Tabela 22.** Distribuição de matéria orgânica do solo até 50 cm de profundidade em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob Sistema de Preparo Convencional e Sistema Plantio Direto recebendo 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados no sulco e lanço (média entre fontes e modos para o mesmo tratamento), tendo o cerrado nativo como referência.

Camada	Sistema		
	Cerrado	Sistema de preparo convencional	Sistema plantio direto
	----- Matéria orgânica do solo (g kg <sup>-1</sup> ) -----		
0-2,5	43,2 aB	34,6 aC	49,3 aA
2,5-5	33,7 bB	30,9 bC	40,1 bA
5-10	30,4 cA	29,7 bA	30,3 cA
10-20	26,2 dA	27,6 cA	23,7 dB
20-30	23,2 eA	21,7 dAB	20,7 eB
30-40	20,5 fA	17,4 eB	17,5 fB
40-50	17,8 gA	15,3 fB	15,7 gB

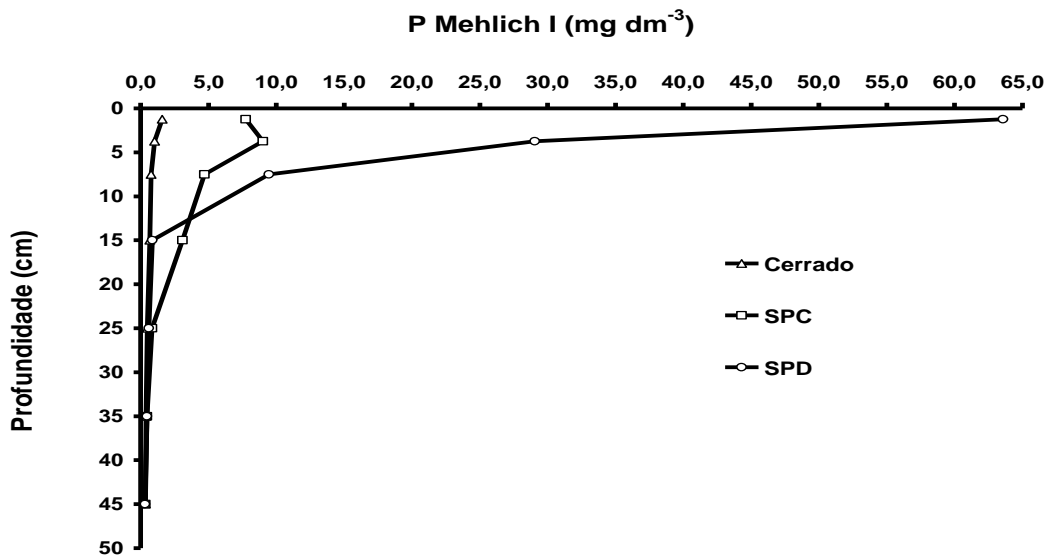
Médias seguidas da mesma letra na linha (maiúscula) e na coluna (minúscula) não diferem entre si pelo Teste de Student (P>0,05)

Realizando uma comparação entre a Figura 04 que é a representação em figura dos dados da Tabela 22 apresentada anteriormente e a Figura 05, que é a representação em figura de parte dos dados dos dados da Tabela 13, observa-se uma grande semelhança no comportamento de distribuição de P e de matéria orgânica entre os dois sistemas cultivados sendo que as justificativas para a distribuição são semelhantes ou seja, no SPD o material vegetal é mantido no local de deposição enquanto no SPC o revolvimento provocado pelo arado de discos desloca-o para a camada de trabalho do implemento. Assim, no SPD observam-se maiores teores de MOS até 5 cm em

comparação com o SPC, que apresenta maiores teores que o SPD na camada de 10-20 cm.



**Figura 04.** Distribuição de matéria orgânica do solo até 50 cm de profundidade em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, independente da fonte e modo de aplicação (média entre tratamentos recebendo fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados a lanço e no sulco), tendo o cerrado nativo como referência.



**Figura 05.** Distribuição até 50 cm de profundidade do P extraível avaliado por Mehlich I em Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado por 14 anos sob sistema de preparo convencional (SPC) ou sistema plantio direto (SPD), recebendo 80 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, independente da fonte e modo de aplicação (média entre tratamentos recebendo fosfato natural reativo e superfosfato triplo aplicados a lanço e no sulco), tendo o cerrado nativo como referência.

Desta forma no SPD onde há grande estoque do P extraível também existe grande estoque de matéria orgânica, o mesmo não acontecendo com o SPC. Assim, os benefícios da MOS em aumentar a disponibilidade de P no solo ocorre em maior proporção no SPD, justificando, em parte, os maiores teores de P e conseqüentemente as maiores produções.

#### 4 CONCLUSÕES

1. A distribuição de fósforo extraível no solo após 14 anos de cultivo avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 é influenciada pela fonte do fertilizante fosfatado, até 10 cm de profundidade no SPD e até 20 cm de profundidade no SPC, para os dois modos de aplicação. Quando o extrator utilizado foi o Bray 1 os maiores teores foram obtidos nos tratamentos com SFT enquanto que quando os extratores foram Mehlich I e Resina os maiores teores foram obtidos nos tratamentos com FNR.

2. A distribuição de fósforo extraível no solo após 14 anos de cultivo avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 é influenciada pelo modo de aplicação do fertilizante fosfatado e pela interação entre o modo e o sistema de cultivo. No SPC há um leve gradiente em profundidade e os modos de aplicação somente difeririam na camada de 2,5-5 cm, com maiores teores do tratamento no sulco em relação ao lanço. No SPD os maiores teores de fósforo ocorreram na camada 0-2,5 cm para os dois modos de aplicação havendo um forte gradiente para aplicações a lanço, que apresentam maiores teores de fósforo nos primeiros 5 cm e menores teores na camada de 5-10, em relação ao sulco.

3. A distribuição de fósforo extraível no solo após 14 anos de cultivo avaliado por Mehlich I, Resina e Bray 1 é influenciada pelo sistema de cultivo, para os dois modos de aplicação e as duas fontes de P. O SPD apresenta maiores teores de fósforo até 10 cm de profundidade porém menores teores na camada de 10-20, em comparação com o SPC.

4. A distribuição da matéria orgânica do solo após 14 anos de cultivo depende do sistema de cultivo e independe da fonte e modo de aplicação do fertilizante fosfatado. O SPD apresenta maiores teores de matéria orgânica até 10 cm de profundidade porém menores teores na camada de 10-20, em comparação com o SPC. No entanto, o estoque de matéria orgânica do solo na camada de 0-50 cm é o mesmo para os dois sistemas.

5. A produtividade de soja no 14º ano da área não foi afetada pelas diferenças na distribuição do fósforo no solo originadas pelas fontes dos fertilizantes fosfatados ou modo de aplicação, mas foi afetada pelo sistema de cultivo, tendo o SPD produzido 15,5 % (544 kg ha<sup>-1</sup>) mais grãos de soja do que o SPC.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, p.537-562. 2004.
- ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 16:349-353, 1992.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, 44:1041-1044, 1980.
- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil & Tillage Research**, 53:215-230, 2000.
- BALL-COELHO, B.R.; ROY, R.C. & SWANTON, C.J. Tillage alters corn root distribution in coarse-textures soil. **Soil & Tillage Research**, 45:237-249, 1998.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York, Jonh Wiley & Sons, Inc. 1984, 398p.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:105-112, 1997.
- BAYER, C.; AMADO, T.J.C.; FERNANDES, S.V. & MIELNICZUK, J. Teores de carbono e nitrogênio total em um solo Podzólico- Vermelho-Escuro submetido 9 anos a diferentes sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Viçosa, 1995. **Resumos expandidos**. Viçosa, SBCS, 1995. p.2036-2038.
- BAYER, C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN NETO, L. & FERNANDES, S.V. Tillage and cropping system effects on organic matter storage in an Acrisol soil in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, 54:101-109, 2000b.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & CERETTA, C.A. Effect of no till cropping systems on soil organic matter in an sandy clay loam Acrisol from

- southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance of  $^{13}\text{C}$ . **Soil & Tillage Research**, 53:95-104, 2000a.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de  $\text{CO}_2$ . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:599-607, 2000c.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D. AMARAL, A.J. ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:155-163, 2004.
- BOLLAND, M.D.A. Residual value for wheat of phosphors from calciphos, Duchess rock phosphate and triple superphosphate on a lateritic soil in south-western Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, 25:198-208, 1985.
- BOLLAND, M.D.A.; BOWDEN, J.W. Long-term availability of phosphorus from calcined rock phosphate compared with superphosphate. **Australian Journal of Agriculture Research**, 33:1061-1071, 1982.
- BORDOLI, J.M.; MALLARINO, A.P. Deep and shallow banding of phosphorus and potassium as alternatives to broadcast fertilization for no-till corn. **Agronomy Journal**, 90:27-33, 1998.
- BRASIL, E.C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 21:599-606, 1997.
- BRAVO, C.A.; GIRALDEZ, J.V.; ORDOÑEZ, R.; GONZALEZ, P.; TORRES, F. Perea. Long-term influence of conservation tillage on chemical properties of surface horizon and legume crops yield in a vertisol of Southern Spain. **Soil Science**, 172:141-148, 2007.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. **Soil Science**, 59:39-45, 1945.
- CASANOVA, E.F.; SALAS, A.M.; TORO, M. Evaluating the effectiveness of phosphate fertilizers in some Venezuela soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 63:13-20, 2002.
- COMISSAO DE FERTILIDADE DO SOLO. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS – Núcleo Regional Sul, 1995. 224p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**.

- 10.ed.: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. Porto Alegre, 2004. 400p.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:527-535, 2003.
- COSTA, F.S.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:323-332, 2008.
- COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D. de.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; CAO, E.G.; HOLZSCHUH, M.J. Phosphorus and root distribution and corn growth related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1237-1247, 2009.
- DE MARIA, I.C.; NnABUDE, P.C. & CASTRO, O.M. Long-term tillage and crop rotation effects on soil chemical properties of a Rhodic Ferrasol in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, 51:71-79, 1999.
- DUIKER, S.W.; BEEGLE, D.B.; Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil & Tillage Research**, 88:30-41, 2006.
- ECKERT, D.J., JOHNSON, J.W. Phosphorus fertilization in no-tillage corn production. **Agronomy Journal**, 77:789-792, 1985.
- EDWARDS, J.H.; BARBER, S. A. Phosphorus uptake rate of soybean roots as influenced by plant age, root trimming, and solution P concentration. **Agronomy Journal**, 68:973-975. 1976.
- EDWARDS J.H.; WOOD, C.W.; THURLOW, D.I.; RUF, M.E. Tillage and crop rotation effects on fertility status of Hapludult soil. **Soil Science Society of America Journal**, 56:1577-1585, 1992.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FEITOSA, C.T. ; RAIJ, B. van. Influência da natureza de fosfatos aplicados a dois solos no fosfato solúvel em extratores químicos e disponível para trigo e milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., Campinas, SBCS, 1975. **Anais**. Campinas, SBCS, 1976. p.215-220.



- FOLLET, R.F.; PETERSON, G.A. Surface soil nutrient distribution as affected by wheat-fallow tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, 52:141-147, 1988.
- GHOSAL, P.K.; CHAKRABORTY, T.; BHATTACHARYA, B.; BAGCHI, D.K. Relative agronomic effectiveness of phosphate rocks and P adsorption characteristics of an Oxic Rhodustalf in Eastern India. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 166:750-755, 2003.
- GOEDERT, W. J.; REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. Avaliação Agronômica de Fontes de Fósforo para a Região dos Cerrados. In: **Relatório técnico anual do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados 1985-1987**. Planaltina, DF: EMBRAPA – CPAC, 1991.
- HARGROVE, W.L.; REID, J.T.; TOUCHTON, J.T.; GALLAHER, R.N. Influence of tillage practices on the fertility status of an acid soil double-cropped soybean production. **Agronomy Journal**, 74:674-684, 1982.
- HERNANI, L.C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W.M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:145-154, 1999.
- HOWARD, D. D.; ESSINGTON, M. E.; LOGAN, J. Long-term broadcast and banded phosphorus fertilization of corn produced using two tillage systems. **Agronomy Journal**, 94:51-56, 2002.
- HOWARD, D. D.; ESSINGTON, M. E.; TYLER, D.D. Vertical Phosphorus and Potassium Stratification in No-Till Cotton Soils. **Agronomy Journal**, 91:266-269, 1999.
- JUNGK, A. & BARBER, S. A. Phosphate uptake rate of corn roots as related to the proportion of the roots exposed to phosphate. **Agronomy Journal**, 66:554-557, 1974.
- KAMINSKI, J. **Efeito de cinco fosfatos pré-, co- e pós-aplicados ao calcário no suprimento de fósforo ao sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench-CV. Conti-Brasil), em três solos ácidos**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ USP, 1983. 126p. (Tese de Doutorado)
- KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, 10:159-206, 1978.
- KHASAWNEH, F.E.; HASHIMOTO, I.; SAMPLE, E.C. Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil: II. Hydrolysis and reactions with soil. **Soil Science Society of America Journal**, 43:52-57, 1979.

- KHASAWNEH, FE.; SAMPLE, E.C.; HASHIMOTO, I. Reaction of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil: I. Mobility of phosphorus. **Soil Science Society of America Proceedings**, 38:446-45, 1974.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy (Trends in Agriculture Science)**, 1:111-115, 1993.
- KORNDÖRFER, G.H.; LARA-CABEZAS, W.A.; HOROWITZ, N. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, 56:391-396, 1999.
- LEHR, J.R.; BROWN, W.E.; BROWN, E.H. Chemical behavior of monocalcium phosphate monohydrate in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, 23:3-7, 1959.
- LINDSAY, W.L.; FRAZIER, A.W.; STEPHENSON, H.F. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, 26:446-452, 1962.
- LINDSAY, W.L.; STEPHENSON, H.F. Nature of the reactions of monocalcium phosphate monohydrate in soils: IV. Repeated reactions with metastable triple-point solution. **Soil Science Society of America Proceedings**, 23:440-445, 1959.
- LINS, I. D. G. **Improvement of soil test interpretations for phosphorus and zinc**. Ph. D. thesis. Faculty of North Carolina State University, Raleigh, 1987. 317 p.
- MALLARINO, A.P.; BORDOLI, J.M.; BORGES, R. Phosphorus and Potassium Placement Effects on Early Growth and Nutrient Uptake of No-Till Corn and Relationships with Grain Yield. **Agronomy Journal**, 91:37-45, 1999.
- MENDES, I.C.; SOUZA, L.V.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Propriedades biológicas em agregados de um Latossolo Vermelho-escuro sob plantio convencional e direto no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:435-443, 2003.
- MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a diferentes modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 16:55-59, 1992.
- NICOLODI, M. GIANELLO, C.; ANGHINONI, I.; MARRÉ, J. & MIELNICZUK, J. Insuficiência do conceito mineralista para expressar a fertilidade do solo percebida pelas plantas cultivadas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2735-2744, 2008. Número Especial.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 1999. 399 p.

- 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.. (Org.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.1, 1129p.
- NUNES, R.S; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J.; SOARES, J.R.R. **Impacto dos Sistemas de Plantio Direto e Preparo Convencional nas Interações entre Matéria Orgânica e Fertilidade do Solo**. IX Simpósio Nacional do Cerrado/II SIMPÓSIO Internacional Savanas Tropicais, Brasília. 6p, 2008, CD ROM.
- OLIVEIRA, M. C. N. de; BARBIN, D.; SILVA, E. S. da; MACEDO, J. R. de; CAPECHE, C. L.; HISSA, H. R. Estimação dos parâmetros de uma função de covariância no estudo da variabilidade espacial do teor de cálcio no solo. **Revista de Matemática e Estatística**, 24:117-132, 2006.
- 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. 726 p.
- RAIJ, B. van.; DIEST, B. van. Phosphate supplying power of rock phosphate in an Oxisol. **Plant and Soil**, 55:97-104, 1980.
- RAIJ, B. van. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 29:1553-1570, 1998.
- RAIJ, B. van. Métodos de Diagnose de Fósforo no Solo em Uso no Brasil. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S. R. e (Ed.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba – SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.563-587, 2004.
- RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2:1-9, 1978.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**, Campinas, Instituto Agronômico, p. 189-199, 2001.
- RESENDE, A.V.; FURINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C.; MUNIZ, J.A.; CURTI, N.; FAQUIN, V.; KIMPARA, D.I.; SANTOS, J.Z.L. & CARNEIRO, L.F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:453-466, 2006.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36:151-160, 2001.

- SAMPLE, E.C.; KHASAWNEH, F.E.; HASHIMOTO, I. Reactions of ammonium ortho- and polyphosphate fertilizers in soil. III. Effects of associated cations. **Soil Science Society of America Journal**, 43:58–65, 1979.
- SANTOS, D.B.M. **Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema plantio direto**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2009, 81 p. Dissertação de Mestrado.
- SANTOS, H.P. dos; TOMM, G.O. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica em função de sistemas de cultivo e de manejo de solo. **Ciência Rural**, 33:477-486, 2003.
- SAS INSTITUTE INC. Versão 9.1. Cary, NC, USA, 2003.
- SAVANT, N.K.; CHIEN, S.H. Greenhouse evaluation of urea supergranule containing diammonium phosphate for transplanted rice. **International Rice Research Newsletter**, 15:23-24, 1990.
- SELLES, F.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; ZENTNER, R. P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**, 44:23-34, 1997.
- SILVA, F.C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade De Fósforo Em Solos Avaliada Por Diferentes Extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 34:267-288, 1999.
- SOUSA, D.M.G. de. **Reações de grânulos de superfosfato triplo em solos e seus efeitos imediatos e residuais sobre as culturas**. 1980. 90p. (Tese de Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2004. 416p.
- SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.(Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2004. 416p.
- SOUSA, D.M.G. de; REIN, T.A. Disponibilidade de Fósforo em Latossolo de Cerrado sob Plantio Direto Adubado com Duas Fontes de Fósforo Avaliada por Diferentes Extratores. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 32, 2009, Fortaleza, CE. [O solo e a produção de bioenergia: perspectivas e desafios] – CD-Rom- **Resumo expandido**.
- 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, Ciência do solo e qualidade de vida: **anais**. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999b.

- SOUSA, D.M.G. de; REIN, T.A.; LOBATO, E.; SOARES, W. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na região dos cerrados. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 27, Brasília-DF, Ciência do solo e qualidade de vida: **anais**. Planaltina: Embrapa Cerrados. CD-ROM. 1999a.
- SOUSA, D.M.G. de; VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do superfosfato triplo aplicado em pó e em grânulos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 11:141-146, 1987.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM – SAS. 9.1 Version for Windows.
- THOMAS, G.W; PEASLEE. Testing soils for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON. J.D. (Eds) **Soil Testing and Plant Analysis**, 1 ed. Madison. p. 111-132, 1973.
- VILELA, L.; SOUSA, D.M.G. de; SILVA, J.E. da. Adubação potássica. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF. Embrapa Cerrados, 2004. p.169-183.
- WELCH, L. F.; MULVANEY, D. L.; BOONE, L. V.; MCKIBBEN, G. E.; PENDLETON, J. W. Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn. **Agronomy Journal**, 58:283-287, 1966.
- YOST, R. S.; KAMPRATH, E. J.; LOBATO, E.; NADERMAN, G. Phosphorus Response of Corn on an Oxisol as Influenced by Rates and Placement. **Soil Science Society of America Journal**, 43:338-343, 1979.
- ZAPATA, E.; ZAHARAH, A.R. Phosphorus availability from phosphate rock and sewage sludge as influenced by the addition of water soluble phosphate fertilizer. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 63:43-48, 2002.