

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -  
AGRONOMIA

**FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE  
FERTILIZANTES FOSFATADOS EM CULTIVOS  
CONSECUTIVOS DE SOJA EM LATOSSOLO DE ALTA  
FERTILIDADE**

Doutoranda: Kássia de Paula Barbosa  
Orientador: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues

RIO VERDE - GO  
Novembro - 2020

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS -  
AGRONOMIA

**FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE  
FERTILIZANTES FOSFATADOS EM CULTIVOS  
CONSECUTIVOS DE SOJA EM LATOSSOLO DE ALTA  
FERTILIDADE**

Doutoranda: Kássia de Paula Barbosa  
Orientador: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração Produção Vegetal Sustentável do Cerrado.

RIO VERDE - GO  
Novembro - 2020

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

B238f      Barbosa, Kássia de Paula  
            Fontes e formas de aplicação de fertilizantes  
fosfatados em cultivos consecutivos de soja em  
Latosolo de alta fertilidade no cerrado / Kássia  
de Paula Barbosa; orientador Carlos Ribeiro  
Rodrigues. -- Rio Verde, 2020.  
            133 p.

            Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia) -  
- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2020.

            1. Fracionamento de fósforo. 2. adubação a lanço. 3.  
adubação na linha. 4. adubos fosfatados. I.  
Rodrigues, Carlos Ribeiro, orient. II. Título.

Responsável: Johnathan Pereira Alves Diniz - Bibliotecário-Documentalista CRB-1 n°2376

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

**Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |  |   |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Tese                             | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação                                 | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input type="checkbox"/> TCC - Graduação                             | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |   |

Nome Completo do Autor: Kássia de Paula Barbosa

Matrícula: 2016202320140026

Título do Trabalho: FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EM CULTIVOS CONSECUTIVOS DE SOJA EM LATOSSOLO DE ALTA FERTILIDADE

**Restrições de Acesso ao Documento**

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 01/02/2021

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

**DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 07/01/2021.

*Kássia de Paula Barbosa*

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Carlos Ribeiro Rodrigues  
Dr. Solos e Nutrição de Plantas  
Eng. Agrônomo  
Prof. / IF Goiano / Rio Verde - GO  
SIAPE nº - 1699899  
CREAMG 94114D

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 57/2020 - NREPG-RV/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

## **FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS EM CULTIVOS CONSECUTIVOS DE SOJA EM LATOSSOLO DE ALTA FERTILIDADE NO CERRADO**

Autora: Kássia de Paula Barbosa  
Orientador: Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 11 de novembro de 2020.

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Presidente)

Prof. Dr. Gustavo Castoldi (Membro interno)

Prof<sup>a</sup>. Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão (Membro externo)

Prof<sup>a</sup> Dra. Patrícia Costa Silva (Membro externo)

Dr. Vinicius de Melo Benites (Membro externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- Vinicius de Melo Benites, Vinicius de Melo Benites - Professor Avaliador de Banca - Centro Nacional de Pesquisa de Solos Cnps - Embrapa (00348003001273), em 30/11/2020 13:28:26.
- PATRÍCIA COSTA SILVA, PATRÍCIA COSTA SILVA - Professor Avaliador de Banca - Ueg (01112580000171), em 23/11/2020 18:20:31.
- Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão, Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão - Professor Avaliador de Banca - Universidade de Rio Verde (01815216000178), em 19/11/2020 15:20:01.
- Gustavo Castoldi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/11/2020 08:01:30.
- Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/11/2020 18:28:05.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 10/11/2020. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 208437  
Código de Autenticação: c205b11556



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
**GOIANO – CAMPUS RIO VERDE**  
**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-**  
**AGRONOMIA**

**FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE**  
**FERTILIZANTES FOSFATADOS EM CULTIVOS**  
**CONSECUTIVOS DE SOJA EM LATOSSOLO DE**  
**ALTA FERTILIDADE**

Doutoranda: Kássia de Paula Barbosa  
Orientador: DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues

TITULAÇÃO: Doutora em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de  
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 11 de novembro de 2020.

---

DSc. Veridiana C. G. Cantão  
Avaliadora Externa  
UniRV/Rio Verde

---

DSc. Patrícia Costa Silva  
Avaliadora Externa  
UEG/Santa Helena de Goiás

---

DSc. Vinicius de Melo Benites  
Avaliador Externo  
EMBRAPA Solos

---

Prof. DSc. Gustavo Castoldi  
Avaliador Interno  
IF Goiano/Rio Verde

---

Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues  
Orientador  
IF Goiano/Rio Verde

A minha irmã Karla de Paula Barbosa,  
A minha avó Claudina Queiroz da Silva,  
Ao meu Orientador Carlos Ribeiro Rodrigues.

**OFEREÇO**

Aos meus pais Eulaine Arcanjo da Silva e Silvio de Paula Barbosa.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Ao IF Goiano Campus Rio Verde-GO, pela oportunidade oferecida com o curso de pós-graduação.

A Deus, por estar sempre presente em minha vida me guiando e dando força para não desistir mesmo quando tudo me fazia querer desistir.

Aos meus amáveis pais Silvio de Paula Barbosa e Eulaine Arcanjo da Silva a quem agradeço todos os dias minha existência. Foram e serão sempre o meu alicerce, me apoiando incondicionalmente em toda minha jornada acadêmica. Pais estes que me ensinaram a perseverar e jamais desistir de um sonho, ensinaram a ter caráter, a ser humilde e sobretudo que Deus é a força para toda batalha. São eles que estão sempre ao meu lado, orientando e me acolhendo quando tudo fica difícil.

A minha melhor amiga, confidente e irmã Karla de Paula Barbosa, que é minha companheira é a pessoa que compartilho desde os momentos de tristeza até os mais maravilhosos. Sempre me traz conforto e palavras de acalento.

Ao meu orientador Carlos Ribeiro Rodrigues, que foi o principal responsável de minhas conquistas, conhecimento e realização desta pesquisa. É sem dúvida a pessoa que me inspira a continuar, a qual tenho tamanho respeito e admiração pelo profissional e pelo ser humano que é. Que com sua paciência compreendeu minhas dificuldades, respeitando meus altos e baixos, sem desistir de mim. E, que com muito carinho e respeito se tornou algo além de um orientador, um amigo!

Aos meus colegas da pós-graduação que auxiliaram em toda a parte prática da pesquisa, trabalho bastante árduo e demorado. Em especial o Raphael Couto, Tâmara Abreu, Andréia Mendes, Patrícia Oliveira, Polyanna Trindade, Vítor Martins e Renato Gouveia, pela incansável ajuda nos momentos mais difíceis deste trabalho e por me abençoarem com a amizade e companheirismo de vocês.

A minha grande amiga Patrícia Costa Silva, a qual tenho enorme admiração, respeito e carinho. Uma profissional excelente, um ser humano que Deus me honrou com sua amizade, alguém que me inspira. Ela que fez parte do meu ingresso na vida acadêmica me incentivando desde os tempos da graduação quando eu ainda era sua aluna, que esteve ao meu lado em meu primeiro passo como professora, sempre me apoiando e contribuindo para o meu crescimento profissional e pessoal.

A todos meus familiares e amigos que acompanharam minha trajetória e me deram carinho e apoio. A minha ex-aluna e atualmente Engenheira Agrícola Terezinha Medeiros, por dispor de seu tempo me ajudado com as análises, por compartilhar sua amizade e dedicação. A Lucas Júnior, por também compartilhar desta conquista me ajudando na parte prática da pesquisa, por acreditar no meu trabalho, por estar ao meu lado com seu carinho e paciência sempre.

A todos vocês eu agradeço com carinho a contribuição direta e indiretamente na concretização deste trabalho tão importante em minha vida!

## **BIOGRAFIA DA AUTORA**

Kássia de Paula Barbosa, nascida em Maurilândia-Goiás em 06 de junho de 1988. Concluiu o ensino médio no Colégio Estadual Sebastião Alves Ferreira sendo último ano que morou nessa cidade e com seus pais.

Em 2009 foi aprovada no curso superior em Engenharia Agrícola Universidade Estadual de Goiás na cidade de Santa Helena de Goiás-Goiás, concluindo o mesmo em 2013. No ano seguinte ingressou pelo Instituto Federal Goiano na cidade de Rio Verde-Goiás, no programa de pós-graduação *Stricto Sensu*, Mestrado em Ciências Agrárias – Agronomia e em 2016 defendeu sua dissertação de Mestrado.

Neste mesmo ano, ingressou no programa de pós-graduação *Stricto Sensu*, Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia, com linha de pesquisa: Tecnologias sustentáveis em sistemas de produção e uso do solo e água pelo Instituto Federal Goiano na cidade de Rio Verde-Goiás.

E com muita perseverança e fé que em 2020 defendeu sua tese de Doutorado, parte indispensável para a obtenção do diploma de Doutora em Ciências Agrárias – Agronomia.

## ÍNDICE GERAL

	Página
ÍNDICE DE TABELAS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES.....	xiii
RESUMO GERAL.....	xv
ABSTRACT .....	xvii
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1 Dinâmica do fósforo no solo.....	2
1.2 Fontes de fósforo.....	5
1.3 Formas de aplicação de fertilizantes fosfatados.....	9
1.4 Fracionamento de fósforo .....	12
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
3. OBJETIVOS.....	28
3.1 Geral.....	28
3.2 Específicos .....	28
CAPÍTULO I.....	29
RESUMO .....	30
ABSTRACT .....	31
1. INTRODUÇÃO .....	32
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	34
3. RESULTADOS.....	42
4. DISCUSSÃO.....	49
5. CONCLUSÃO .....	59
6. AGRADECIMENTOS.....	60
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
CAPÍTULO II .....	69
RESUMO .....	70
ABSTRACT .....	71

1. INTRODUÇÃO .....	72
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	74
3. RESULTADOS .....	78
3.1. Frações do fósforo após a safra 2016/2017.....	78
3.2. Frações do fósforo após a safra 2017/2018.....	82
4. DISCUSSÃO.....	89
5. CONCLUSÃO .....	99
6. AGRADECIMENTOS.....	100
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
8. ANEXOS.....	109
CONCLUSÃO GERAL.....	112

## ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Capítulo I	
<b>Tabela 1.</b> Características morfológicas dos horizontes pedogenéticos do Latossolo Vermelho Distrófico correlato aos Oxisols na Soil Taxonomy e aos Ferrasols (Ferrasoles) na WRB/FAO. ....	36
<b>Tabela 2.</b> Caracterização química do solo na camada de 0,0 – 0,10 m antes do plantio das safras 2016/2017 e 2017/2018. ....	38
Capítulo II	
<b>Tabela 1.</b> Caracterização das frações de P ( $\text{mg kg}^{-3}$ ) no solo na camada de 0,0 – 0,10 m antes do plantio da safra 2016/2017(COUTO, 2018). ....	74
<b>Tabela 2.</b> Resumo da ANOVA (F calculado) das variáveis avaliadas na Safra 2016/2017. ....	78
<b>Tabela 3.</b> Resumo da ANOVA (F calculado) das variáveis avaliadas na Safra 2017/2018. ....	83
<b>Tabela 4.</b> Coeficientes de correlação entre as Frações de P no solo e variáveis de teor de P no solo extraído por Mehlich I (P-MI) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), balanço de P ( $\text{kg ha}^{-1}$ de $\text{P}_2\text{O}_5$ ), eficiência de uso das fontes ( $\text{kg kg}^{-1}$ de grãos), teor de P no estágio R1(P(R1)) ( $\text{g kg}^{-1}$ de P), restos culturais (RC) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), P nos restos culturais (PRC) ( $\text{kg ha}^{-1}$ de $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e exportação de P ( $\text{kg ha}^{-1}$ de $\text{P}_2\text{O}_5$ ) nas safras 2016/2017 e 2017/2018. ....	88
<b>Tabela 5.</b> Coeficientes de correlação entre as frações de P obtidos após a safra 2016/2017 e 2017/2018. ....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Introdução Geral

**Figura 1.** Formas de fósforo no sistema solo-planta. Adaptado de Novais et al., 2007. . 4

Capítulo I

**Figura 1.** Precipitação total (mm) e Temperatura máxima e mínima (°C) durante as safras 2016/2017 (10 de dezembro de 2016 a 24 de março de 2017) e 2017/2018 (17 de novembro de 2017 a 21 de março de 2018). Rio Verde, Goiás, Brasil. .... 35

**Figura 2.** Teores de P foliar ( $\text{g kg}^{-1}$ ) em R1 (A), Altura (m) (B), Peso de mil grãos (g) (C), Produtividade da soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (D) e Exportação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  pela soja safra 2016/2017 em  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (E), em função das fontes (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes. As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C, D, E e F, correspondem aos valores obtidos pelo tratamento controle. 43

**Figura 3.** Restos Culturais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (A), Teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nos restos culturais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (B), P residual disponível pelo extrator Mehlich I ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (P-MI) (C), P residual disponível pelo extrator (P- $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (D) após a colheita da soja da safra 2016/2017 em função das fontes de P (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes. As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C e D correspondem aos valores obtidos pelo tratamento controle. 44

**Figura 4.** Teores de P foliar ( $\text{g kg}^{-1}$ ) em R1 (A), Altura (m) (B), Peso de mil grãos (g) (C), Produtividade da soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (D) e Exportação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  pela soja safra 2017/2018

em  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (E), em função das fontes (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes. As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C, D, E e F, correspondem aos valores obtidos pelo tratamento controle. .... 46

**Figura 5.** Restos Culturais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (A), Teor de fósforo (P) nos restos culturais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) (B), P residual disponível pelo extrator Mehlich I ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (P-MI) (C), P residual disponível pelo extrator (P- $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (D) após a colheita da soja da safra 2016/2017 em função das fontes de P (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes e correlação entre a produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e os teores de P disponível no solo antes do plantio da safra 2017/2018 obtidos pelos extratores Mehlich I (P-MI) e  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (P- $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) (E). As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C e D correspondem aos valores obtidos pelo tratamento controle. .... 48

**Figura 6.** Eficiência agrônômica (%) e de uso das diferentes fontes de fósforo na cultura da soja nas safras 2016/2017 (A e B, respectivamente) e 2017/2018 (C e D, respectivamente); correlação entre os teores foliares e a produtividade de grãos da soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018 (E) e balanço de P nas safras 2016/2017 e 2017/2018 (F). .... 50

**Figura 7.** Correlação entre os teores de Ca disponível antes do plantio com a produtividade de grãos da soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018. .... 52

## Capítulo II

**Figura 1.** Esquema de fracionamento de fósforos inorgânico, orgânico e microbiano do solo, segundo método proposto por Hedley et al. (1982) e modificações sugeridas por Chen et al. (2000). .... 76

**Figura 2.** Efeito das fontes (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) sobre os teores de fósforo total (P-total) e das frações de fósforo inorgânico total (Pi-total) e fósforo orgânico total (Po-total) em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVD) após a colheita da safra 2016/2017. .... 79

**Figura 3.** Frações de fósforo (P) inorgânica em solução (Pi-sol) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (A), Lábil (Pi-Lábil) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (B), pouco a moderadamente Lábil (Pi-NLábil) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (C), precipitado com Ca (Pi-Ca) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (D) e ocluso (P-ocluído) (E) e P orgânico microbiano (Po-mic) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (F), Lábil (Po-Lábil) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (G) e moderadamente a pouco lábil (Po-NLábil) (H) em Latossolo Vermelho Distrófico em função de fontes fosfadas (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e das formas de aplicação (Lanço e Linha) após a safra da soja 2016/2017. 81

**Figura 4.** Efeito das fontes (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (a lanço e na linha) sobre os teores de fósforo total (P-total) e das frações de fósforo inorgânico total (Pi-total) e fósforo orgânico total (Po-total) em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVD) após a colheita da safra 2017/2018. .... 84

**Figura 5.** Frações de fósforo (P) inorgânica em solução (Pi-sol) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (A), Lábil (Pi-Lábil) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (B), pouco a moderadamente Lábil (Pi-NLábil) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (C), precipitado com Ca (Pi-Ca) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (D) e ocluso (P-ocluído) (E) e P orgânico microbiano (Po-mic) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (F), Lábil (Po-Lábil) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) (G) e moderadamente a pouco lábil (Po-NLábil) (H) em um Latossolo Vermelho Distrófico em função de fontes de fertilizantes fosfatos (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e de suas formas de aplicação (Lanço e Linha) após a safra de soja 2017/2018. 86

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
<b>ANEXO 1.</b> Roteiro metodológico do fracionamento químico do fósforo no solo conforme Hedley et al. (1982) modificado por Chen et al. (2000).	118

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

<b>Símbolo / Sigla</b>	<b>Significado</b>
P	Fósforo
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de difósforo
MI	Mehlich I
pH	Potencial hidrogeniônico
FR	Fosfato Reativo
SS	Superfosfato Simples
MAP	Monoamônio Fosfato
ST	Superfosfato Triplo
°C	Graus Celsius
ha	Hectare
SPD	Sistema de Plantio Direto
SPC	Sistema de Plantio Convencional
Aw	Clima Tropical Úmido
GO	Goiás
mm	Milímetro
mL	Militros
L	Litro
cm	Centímetro
kg	Quilograma
CaCl <sub>2</sub>	Cloreto de Cálcio
S	Enxofre
mg	Miligrama
dm <sup>-3</sup>	Decímetro cúbico
K	Potássio
Ca	Cálcio
cmol <sub>c</sub>	Centimol Carga
Mg	Magnésio
Al	Alumínio
H	Hidrogênio
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Ácido bórico
g	Gramas
MnSO <sub>4</sub>	Sulfato de manganês
CuSO <sub>4</sub>	Sulfato de cobre
	Continua...

Continuação...

Mo	Molibidênio
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
Mg	Megagrama
ns	Não significativo
*	Significativo a 5% de probabilidade
**	Significativo a 1% de probabilidade
ZnSO <sub>4</sub>	Sulfato de zinco
N	Nitrogênio
K <sub>2</sub> O	Óxido de potássio
%	Porcentagem
+	Mais
H <sub>2</sub> O	Água
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrogênio
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
CNA	Citrato neutro de amônio
NaOH	Hidróxido de sódio
HCl	Ácido clorídrico
NaHCO <sub>3</sub>	Bicarbonato de sódio
RTA	Resina de troca de aníons
R3	Estádio fenológico
NH <sub>4</sub> Cl	Cloreto de amônio
Ef	Eficiência de fontes
EU	Eficiência de uso
Po	Fósforo orgânico
Po-Lábil	Fósforo orgânico lábil
Po-NLábil	Fósforo orgânico pouco ou moderadamente lábil
Po-mic	Fósforo orgânico microbiano
Pi	Fósforo inorgânico
Pi-sol	Fósforo inorgânico na solução do solo
Pi-Ca	Fósforo inorgânico precipitado com cálcio
Pi-ocluso	Fósforo inorgânico ocluso
Pi-Lábil	Fósforo inorgânico lábil
Pi-Nlábil	Fósforo inorgânico pouco ou moderadamente lábil

---

## RESUMO GERAL

BARBOSA, KÁSSIA DE PAULA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, novembro de 2020. **Fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados em cultivos consecutivos de soja em Latossolo de alta fertilidade no cerrado.** Orientador: DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues.

A região central do Brasil tem grande importância econômica em relação a produção de grãos no país. Nessas regiões o solo apresenta baixa disponibilidade de nutrientes, principalmente fósforo (P). Diante da importância do nutriente P para o desenvolvimento agrícola de diversas culturas, vários estudos têm sido desenvolvidos com a finalidade de garantir maior eficiência no uso de fertilizantes fosfatos. Atualmente, a busca por sistemas mais sustentáveis faz-se necessário, visto que as reservas de P são fontes esgotáveis. Neste sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica do fósforo no solo e a produtividade da soja sob fontes de fertilizantes fosfatados e suas formas de aplicação. O trabalho foi desenvolvido em área experimental do IF Goiano, nas safras de 2016/2017 e 2017/2018, sendo parte de um projeto com histórico de duas safras de soja anteriores (2014/2015 e 2015/2016). O delineamento experimental foi em blocos ao acaso em esquema fatorial  $4 \times 2 + 1$  sendo, quatro fontes de fósforo: Fosfato Reativo de Marrocos (FR); Monoamônio Fosfato (MAP); Superfosfato Simples (SS) e o Superfosfato Triplo (ST), duas formas de aplicação (na linha de semeadura e a lanço), e o Controle sem adubação fosfatada, com quatro repetições. Este trabalho foi dividido em dois capítulos. No Capítulo 1, utilizou-se Mehlich I como extrator para avaliar os teores de P no solo e na planta, também se determinou a produtividade da soja e a eficiência dos fertilizantes fosfatados e suas formas de aplicação. No Capítulo 2, fez-se uso do fracionamento proposto por Hedley et al. (1982), e modificações sugeridas por Chen et al. (2000) para avaliar o comportamento das frações de P no solo em função das fontes fosfatadas e suas formas de aplicação.

Observou-se que os fertilizantes fosfatados solúveis, MAP, SS, ST aumentaram a produtividade da soja e os teores de P no solo nas frações lábeis e de menor labilidade. A aplicação do FR, mesmo após quatro safras consecutivas, não proporcionou incrementos na produtividade de grãos da soja, e com menores incrementos nos teores de P das frações lábeis no solo, comparado as fontes solúveis.

**Palavras-chave:** Fracionamento de fósforo, eficiência agronômica, *Glycine max*, produtividade.

## ABSTRACT

BARBOSA, KÁSSIA DE PAULA. Goiano Federal Institute – Rio Verde Campus – GO, november 2020. **Sources and forms of application of fertilizers phosphate in consecutive soybean crops in high fertility Latosol in the cerrado.** Advisor: DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues.

The central region of Brazil has great economic importance in relation to grain production in the country. In these regions the soil has low nutrients availability, mainly phosphorus (P). Considering the importance of nutrient P for agricultural development of several crops, several studies have been developed in order to ensure greater efficiency in the use of phosphate fertilizers. Currently, the search for more sustainable systems is necessary, since P reserves are reducing. In this sense, the objective of this study was to evaluate the phosphorus dynamics in soil and the productivity of soybeans under sources of phosphate fertilizers and their application forms. The work was developed in an experimental area of the IF Goiano, in the 2016/2017 and 2017/2018 harvests, being part of a project with a history of two previous soybean harvests (2014/2015 and 2015/2016). The experimental design was in random blocks in a  $4 \times 2 + 1$  factorial scheme, being four sources of phosphorus: Morocco Reactive Phosphate (FR); Monoammonium Phosphate (MAP); Simple Superphosphate (SS) and Triple Superphosphate (TS), two forms of application (in the sowing line and the haul), and the Control without phosphate fertilization, with four replications. This work was divided into two chapters. In Chapter 1, Mehlich I was used as an extractor to evaluate the P content in the soil and plant, soybean productivity and the efficiency of phosphate fertilizers and their forms of application were also determined. In Chapter 2, the fractionation proposed by Hedley et al. (1982) was used, and modifications suggested by Chen et al. (2000) to evaluate the behavior of the P fractions in the soil in function of the phosphate sources and their application forms. It was observed that the soluble phosphate fertilizers, MAP, SS, ST increased the soybean

productivity as well as the P content in the soil in labile fractions and lower lability. The FR application, even after four consecutive harvests, did not provide increases in soybean grain productivity, and with smaller increases in the P content of the labile fractions in the soil, compared to soluble sources.

**Keywords:** Phosphorus fractionation, agronomic efficiency, Glycine max, productivity.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A adubação fosfatada durante muito tempo foi aplicada em grandes quantidades pelos produtores, principalmente sob o bioma Cerrado. Isso sempre ocorreu em função do paradigma dos solos neste bioma apresentar alta capacidade de adsorção de fósforo (P), que pode ter valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) iguais ou superiores a  $1 \text{ mg g}^{-1}$  de P (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Assim, durante muitos anos, principalmente após a década de 1980 do século XX, sempre foram aplicadas altas doses de fertilizantes fosfatados, levando a criação de uma “poupança” de P no solo, ou “legado de P” no solo (WHINTERS et al., 2018; PAVINATO et al., 2020). No solo, o P possui dinâmica complexa, e pode tanto reagir com cátions presentes na solução, quanto com as cargas de superfície dos coloides orgânicos, formando compostos ternários, e principalmente as superfícies de minerais do solo como os oxihidróxidos de Fe e Al. Assim, nem todo o legado do P presente no solo estará disponível para as plantas. Sendo que os processos de redução da labilidade do P aumentam, quanto maior o tempo de contato do fertilizante com o solo (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Com a evolução da agricultura no Brasil, houve aumento das doses de fertilizantes fosfatados aplicados. Todavia, o incremento na produção de alimentos foi menor que o aumento da quantidade destes fertilizantes fosfatados, ou seja, houve com o tempo a redução da eficiência do uso do P na agricultura Brasileira. Juntamente a isso, destaca-se que há redução da vida útil das minas de exploração do mineral matéria-prima utilizada na fabricação dos fertilizantes fosfatados no Brasil (fluo-cloro-hidroxihapatitas), que era estimado em 60 anos em 2004 (DAHER, 2014; LOPES et al., 2014) e 50 anos em 2020. Fato, este similar as reservas de minerais nos EUA, cuja vida útil também foi estimada em menos de 35 anos. Esses dados permitiram uma reportagem de destaque na revista “The Guardian”, em que pesquisadores da Rothamsnted Reserach Center afirmaram que

a próxima grande crise mundial na agricultura ocorrerá pela oferta de fertilizantes fosfatados (CARRINGTON, 2019). Essa crise poderá colocar em risco a segurança alimentar do mundo, já que os maiores produtores agrícolas mundiais, os EUA e o Brasil, e ambos possuem baixa vida útil das minas que exploram a matéria-prima para a fabricação de fertilizantes fosfatados.

Diante desse cenário é importante o desenvolvimento de tecnologias que visem aumentar a eficiência do uso de fontes de fertilizantes fosfatados, como também viabilizar tecnicamente a ciclagem do estoque, legado do P presente nos solos. Basicamente, a calagem, e principalmente a adoção de sistemas de cultivo que proporcionam o aumento da matéria orgânica do solo em quantidade e qualidade (diversidade), são as principais técnicas para reduzir as perdas de P. Mas, podem somar a essas tecnologias o desenvolvimento de novos fertilizantes fosfatados, ou mesmo a mistura com aditivos que possam trazer ganhos quanto à eficiência de uso do P. E para isso é importante entender a dinâmica do P quanto as suas formas de ocorrência no solo quando se utiliza diferentes fontes, levando em consideração, principalmente o P excedente, que cria esse legado. A partir do conhecimento da dinâmica do P no solo, pode-se desenvolver tecnologias para serem agregadas às fontes já existentes, reduzindo deste modo as doses de aplicação e aumentando a eficiência de absorção pelas culturas.

Sendo assim, a presente tese, teve como objetivo, avaliar o efeito de diferentes fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados, na produção da soja em terceira e quarta safra consecutiva, bem como, analisar os efeitos residuais das frações do P no solo.

### **1.1 Dinâmica do fósforo no solo**

Os solos brasileiros em sua maioria apresentam baixa disponibilidade de P, sendo necessária a realização de adubação com fertilizantes fosfatados para garantir o suprimento desse nutriente no solo e, conseqüente disponibilidade para as plantas. Esse nutriente presente no solo provém do intemperismo da apatita, que libera íons fosfato na solução do solo, contudo, grande parte do teor de P no solo fica indisponível pela fixação inorgânica e imobilização microbiana, resultando baixo teor na solução do solo (BAZANI, 2013). Assim, o fornecimento de P de forma natural mediante a intemperização do mineral de origem, bem como da mineralização da matéria orgânica se tornam insuficientes para atender a demanda nutricional das plantas, fazendo-se

necessário o uso de fertilizantes fosfatados (STAUFFER e SULEWSKI, 2004).

Com o aumento do intemperismo, o fornecimento de P é reduzido e os sítios de adsorção aumentam e contribui para que o solo passe de fonte para dreno de P, ou seja, o solo passa a competir com a planta pelo nutriente devido a formação de complexos de alta especificidade e energia de ligação diminuindo deste modo a disponibilidade de P inorgânico (Pi) na solução do solo (NOVAIS et al., 2007). Isso ocorre nos solos do Cerrado em especial os Latossolos, os quais apresentam baixa disponibilidade de P, sendo essa classe de solo um forte dreno desse nutriente (NOVAIS et al., 2007; NUNES, 2014).

Nos solos altamente intemperizados o nutriente P apresenta alguns desafios: (i) o P se encontra em baixas concentrações na solução do solo; (ii) a maioria dos compostos de P no solo estão em formas indisponíveis para as plantas; (iii) o P aplicado por meio de fontes solúveis reage com os minerais de argila, matéria orgânica e outros elementos como ferro (Fe), alumínio (Al), manganês (Mn) e cálcio (Ca), impossibilitando sua disponibilidade às plantas (BRADY e WEIL, 2013). No solo, o teor de P pode variar de 35 até 5.300 mg kg<sup>-1</sup>, com valor médios a cerca de 800 mg kg<sup>-1</sup> (ESSINGTON, 2004), e pela baixa mobilidade no perfil do solo se concentra nas camadas superficiais (VOGEL, 2014). Dentre todas as formas de P, somente as iônicas H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> e HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e alguns compostos de P orgânico (Po) solúveis, são absorvidos pelas raízes (NOVAIS et al., 2007; BRADY e WEIL, 2013).

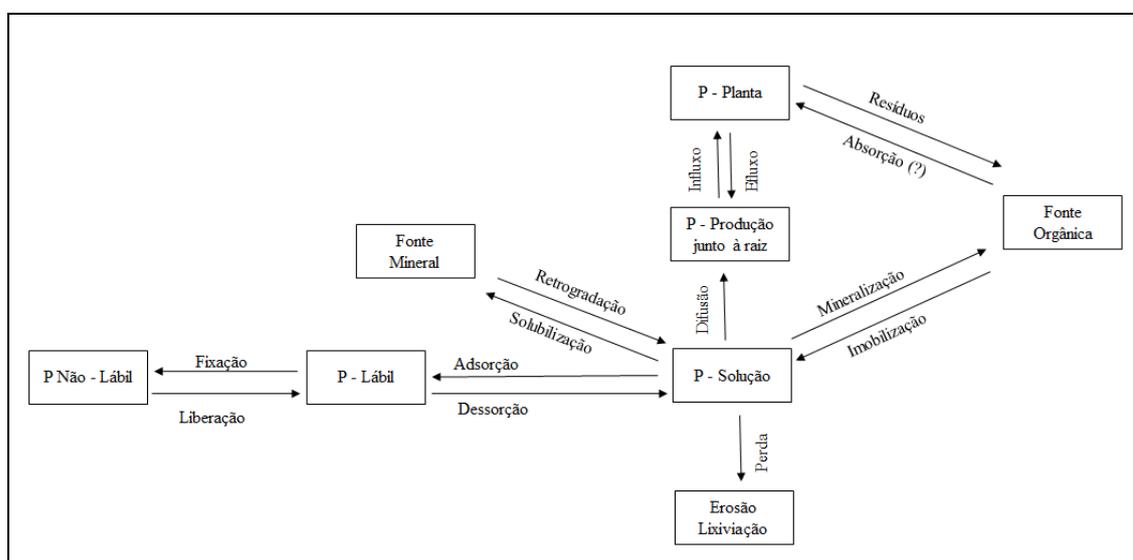
O P no solo está presente nas fases sólida e líquida (em solução), adsorvido ou complexado com oxihidróxidos de Fe, Al, Ca e com a matéria orgânica; ou também pode estar livre na solução do solo (PAVINATO, 2007). No solo este nutriente pode ser dividido de acordo com a natureza do composto a que está ligado: fósforo orgânico e fósforo inorgânico, tanto na fase sólida como na solução do solo (PAVINATO, 2007, SANTOS, 2013).

O Po está presente nos resíduos em decomposição, os quais podem ser de origem animal, vegetal e humana (PAVINATO, 2007), em que os principais grupos de Po em extrato de solo, ocorrem na forma de monoésteres (R-O-PO<sub>3</sub>), diésteres (R-O-PO<sub>2</sub>-O-R'), fosfonatos (R-PO<sub>4</sub>), fosfatos inorgânicos ortofosfatos (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) e pirofosfatos (P<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>3-</sup>) (GYANESHWAR et al., 2002; NOVAIS et al., 2007). As fontes minerais de fósforo são responsáveis por compor o Pi no solo, em solos altamente intemperizados os compostos inorgânicos mais comuns de P são a estregnita (FePO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) e variscita (AlPO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) (NOVAIS e SMYTH, 1999). Nesses solos o Pi pode ser encontrado ligado ao Fe, Al e Ca, adsorvido a matéria orgânica, oxi-hidróxidos de Fe, Al e argilas silicatadas do tipo

1:1 (NOVAIS e SMYTH, 1999; GATIBONI, 2003).

O fósforo utilizado pelas plantas se encontra em formas inorgânicas (MARSCHNER, 2012), entretanto, Condrón e Tiessen (2005) afirmaram que o estoque de Po no solo pode corresponder de 15 a 80% do fósforo total (P-total), sendo que as frações orgânicas e inorgânicas são capazes de atuar como fonte ou dreno para solução do solo, dependendo da qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) e do tipo de mineral.

Como citado, o P no solo está dividido em orgânico e inorgânico dependendo da natureza do composto a que está ligado, contudo, dentro desses dois grupos ainda é possível identificar formas de P na relação solo-planta e o grau de labilidade (disponibilidade) desse nutriente no solo (Figura 1) (NOVAIS et al., 2007).



**Figura 1.** Formas de fósforo no sistema solo-planta. Adaptado de Novais et al., 2007.

O P presente na solução (P-solução) do solo é responsável por disponibilizar esse nutriente para a planta, porém, essa forma de fósforo pode sofrer alterações em algumas condições do solo, como em pH elevado o P pode migrar para alguma forma de baixa reatividade aumentando o compartimento Fonte Mineral e com isso o P-solução diminuiria o seu estoque, nesse sentido, há uma indisponibilidade do nutriente pela combinação com outros elementos, em com o Ca. Outras formas de alterar o estoque de P na solução do solo podem ser: através da imobilização da matéria orgânica, pela perda por erosão do solo e lixiviação, bem como pela adsorção e fixação do mesmo em argilas não silicatadas (NOVAIS e SMYTH, 1999). Em solos altamente intemperizados as perdas por lixiviação são desprezíveis pela baixa solubilidade dos compostos orgânicos e

inorgânicos e a forte ligação das formas inorgânicas com os minerais de argila (BAZANI, 2014).

A mineralização da matéria orgânica contribui para o aumento do P-solução do solo. Entretanto, poderá haver imobilização temporária de P da solução do solo pela sua incorporação à biomassa microbiana que se faz necessária para que mineralização aconteça mediante a redução da relação carbono e fósforo (C/P), então o P-solução volta a aumentar com o predomínio da mineralização sobre a imobilização. Com o aumento do P-solução pelas fontes minerais ou orgânicas haverá um desequilíbrio em relação ao P-lábil, aumentando a adsorção de P proveniente da solução do solo e por consequência favorecendo a difusão de P em direção às raízes das plantas. Enquanto o P-solução é extraído pela absorção, o P-lábil manterá o equilíbrio para o sistema-solo, assim o P-lábil funciona como um agente tamponante que regula os excessos e déficits do P-solução, dentro dos limites de cada solo (NOVAIS e SMYTH, 1999).

A transformação do P-lábil em P não lábil se dá mediante a fixação de P, ou seja, pela retenção de P pelo solo de forma não reversível, pelo menos a curto prazo. Em solos menos intemperizados, alcalinos ou com presença de resíduos de fosfatos naturais não solubilizados no solo, há ocorrência das formas inorgânicas de fósforo ligado a cálcio (P-Ca) que também são formas de P não lábil (NOVAIS et al., 2007). Essa forma de P não é desejável a curto prazo, pois terá menos fósforo disponível para ser absorvido pelas plantas.

As formas de P no solo descrevem como o P se comporta, e seu grau de labilidade permite quantificar a disponibilidade desse nutriente. Sendo assim, se o P está na solução ou fracamente adsorvido estará na forma lábil, se estiver adsorvido com argilas e oxihidróxidos de Fe e Al, o grau de interação é que regulará a labilidade de P (PAVINATO e ROSOLEM, 2008). Logo, as formas P no solo se mostram importantes para a discussão sobre as fontes de fósforo e a forma de aplicação que melhor contribuem para disponibilidade do P na solução do solo.

## **1.2 Fontes de fósforo**

O uso de fertilizantes é uma prática que visa repor os nutrientes na solução do solo. A adubação fosfatada é realizada a fim de elevar o P na solução do solo, principalmente em solos que apresentam baixa disponibilidade desse nutriente. Assim, o uso de fertilizantes minerais tem crescido em todo o mundo, no final do século XX em

expansão no século XXI (HANSEL, 2013).

Os fertilizantes fosfatados utilizados podem apresentar alta ou baixa solubilidade em água, e determina a velocidade na disponibilização de P no solo. Os fertilizantes de alta solubilidade em água compreendem os superfosfatos e os fosfatos de amônio, sendo os superfosfatos obtidos por processos industriais através do ataque da rocha fosfática com ácidos, já o monoamônio fosfato (MAP) provém pela neutralização da amônia com ácido fosfórico, enquanto os fosfatos naturais são obtidos a partir de minérios fosfáticos após os processos de lavagem, e estes quando aplicados no solo apresentam baixa solubilidade em água (MALAVOLTA, 1981). Dentre as fontes de P tem-se: (i) fosfatos naturais (rocha fosfática apatita moída); (ii) termofosfatos (obtida através de processo térmico); (iii) fosfatos totalmente acidulados (acidulação total); (iv) fosfatos alternativos (parcialmente acidulados) (PROCHNOW et al., 2004).

No Brasil os fertilizantes fosfatados solúveis em água usualmente comercializados são o MAP, o superfosfato simples (SS) e o superfosfato triplo (ST). Estas fontes são consideradas de maior reatividade e apresentam alta eficiência agrônômica (SANTOS, D. et al., 2008). O MAP é uma fonte que apresenta altas concentrações de nitrogênio (N) cujo teor vai de 10 a 12%, e de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) cuja amplitude varia de 48 a 60%, e alta solubilidade, vale ressaltar que esta fonte é obtida através da reação do ácido fosfórico com amônia (MALAVOLTA, 1981), e, e quando em contato com o solo se torna rapidamente disponível para as plantas nas formas iônicas  $NH_4^+$  e  $H_2PO_4^-$  (REETZ, 2017). Quanto ao SS há a presença de três formas de P: fosfato monocálcico (solúvel em água), fosfato bicálcico (insolúvel em água e solúvel em citrato de amônio) e fosfato tricálcico ou apatítico (insolúvel em água e em citrato de amônio); é produzido pela reação da rocha fosfática com ácido sulfúrico, contém 16 a 20% de  $P_2O_5$ ; 18 a 21% de Ca e 11 a 12% de enxofre (S) (MALAVOLTA, 1981; REETZ, 2017). O ST é produzido através da reação do concentrado fosfatados com o ácido fosfórico e contém 41% de  $P_2O_5$  e 7 a 12% de Ca; e a principal forma de P é o fosfato monocálcico (MALAVOLTA, 1981; RAIJ et al., 1996). O ácido sulfúrico usado no processo de industrialização das fontes solúveis de fósforo tem por finalidade transformar o fosfato tricálcico em uma forma mais solúvel (monocálcico) ou em ácido fosfórico (LOPES et al., 2010).

Outra fonte de P que vem sendo utilizada são os fosfatos naturais reativos (FR), esses apresentam menor custo em comparação aos anteriormente citados, contudo, seu aproveitamento é em geral menor, a curto prazo, por sua baixa reatividade e consequentemente a baixa ou lenta liberação de P para as plantas (NOVAIS et al., 2007).

São obtidos pela moagem da rocha fosfática podendo passar ou não por processos de lavagem e/ou flotação (PROCHNOW et al., 2004; NICCHIO, 2015) e contém 24 a 40% de  $P_2O_5$  (MALAVOLTA, 1981).

A adição de um fertilizante fosfatado no solo implica numa sequência de eventos físico-químicos que culminam na transformação do fosfato em substâncias fosfatadas complexas, as quais governam a disponibilidade desse nutriente no solo. Portanto, quando adicionadas ao solo fontes solúveis em água, ocorrerá reação rápida e os novos compostos formados são capazes de manter uma solução saturada em P na região do grânulo, criando um gradiente osmótico que promove o deslocamento da água em sua direção e concomitante difusão da solução da região mais concentrada para as de menor concentração (SILVA, 2011).

Os fatores que interferem na eficiência dos fosfatos solúveis, em geral, são relativos às propriedades dos fertilizantes, do solo, das práticas de manejo e da cultura empregada (CHIEN et al., 1990). A variação de solubilidade dos compostos formados nas reações dos adubos fosfatados solúveis com o solo é um fator que pode interferir na eficiência com que esses compostos suprem as plantas, e provavelmente é uma das principais causas das distintas respostas das culturas a diferentes fontes de fertilizantes fosfatados solúveis em água (TAYLOR et al., 1960; BARROW, 1973).

Os fertilizantes fosfatados de baixa solubilidade ao serem adicionados ao solo promovem um movimento menor da água em sua direção, e esta solução influenciará volumes menores de solo ao redor do grânulo, assim as rotas do movimento de P serão a difusão na solução do solo e fluxo de massa, logo a disponibilidade dependerá da quantidade de água no solo o que facilitará o acesso da raiz ao nutriente (KAMINSK e PERUZZO, 1997). Embora estes fosfatos apresentem menor disponibilidade imediata de P para as plantas, em contrapartida apresentam menor custo, porém em solos considerados de alto dreno a sua utilização só é conveniente desde que essa menor reatividade não interfira no processo de difusão, garantindo deste modo P para as plantas (HOROWITZ e MEURER, 2004; NOVAIS e SMYTH, 1999). Nesse contexto, os FR apresentam um efeito residual compensatório a longo prazo (SILVA, 2011) e sua eficiência é aumentada em solos ácidos (GOEDERT e LOBATO, 1980; RAJAN et al., 1996).

Os estudos sobre as fontes de fertilizantes fosfatados têm apresentado diversos resultados no que se refere à sua eficiência agrônômica em várias culturas, e também o comportamento destes no solo. Machado et al. (2011) utilizando MAP como fonte de P

em doses crescentes em solos com textura argilosa, média e arenosa, observaram que o solo arenoso apresentou maior disponibilidade P em função da dose aplicada e o solo de textura média seguido do argiloso apresentaram maior adsorção e menor disponibilidade do nutriente. A fração argila, principalmente a sua composição mineralógica, é a responsável por definir se o solo é dreno ou fonte de P, assim, em solos arenosos há uma tendência menor de adsorção desse nutriente aos colóides do solo (FALCÃO e SILVA, 2004; NOVAIS et al., 2007). Solos altamente intemperizados, ricos em oxihidróxidos de Fe (goethita, hematita e magnetita) na fração argila, possuem alta capacidade de adsorção de P, principalmente quando os solos possuem baixo teor de matéria orgânica, onde o ponto de carga zero desses oxihidróxidos de Fe são entre 9 a 10, proporcionando predominância de cargas positivas variáveis as quais podem formar ligações fortes com o ânion fosfato, envolvendo compartilhamento de oxigênio (COSTA e BIGHAM, 2009).

Em um estudo com adubação fosfatada por 14 anos em sistema de plantio direto (SPD) e convencional (SPC) utilizando ST e FR, Nunes et al., (2011) relataram que o ST proporcionou maiores teores de P extraível em comparação com FR nos dois sistemas de cultivo. Isso pode ser justificado pela maior solubilidade do ST quando comparada com a do FR, e contribuiu para dissolução rápida disponibilizando prontamente o P para as plantas (BOLLAND e BOWDEN, 1982). O ST tem apresentado maior eficiência na disponibilidade de P com maior produção de massa seca e incremento desse nutriente no tecido de plantas, quando comparado aos fosfatos naturais (RAMOS et al., 2009; FONTOURA et al., 2010; SILVA et al., 2011).

Nascimento et al. (2019) avaliando o comportamento inicial de plantas de milho, submetidas à aplicação fontes fosfatadas (Fosfato natural reativo de Arad e SS) e micronutrientes em um Latossolo Amarelo observaram, melhores respostas para a maioria dos parâmetros fitométricos no milho quando aplicado o SS, com e sem adição dos micronutrientes. Veloso et al., (2016) avaliando a resposta do milho sob doses e fertilizantes fosfatados (SS, ST e fosfato reativo de Bayóvar) obtiveram maior produtividade de grãos com aplicação do ST e maiores teores de P na folha quando se aplicou SS e ST em relação ao fosfato reativo de Bayóvar. Esses resultados corroboram para afirmação de que fontes de alta reatividade e solubilidade contribuem para o rendimento imediato das culturas.

Nascente et al., (2014) estudaram o efeito da aplicação de fontes de P com ou sem Ca nos componentes de produção e produtividade do feijoeiro comum na região do Cerrado, e observaram que as fontes de fósforo associado ao cálcio (SS; MAP + CaNO<sub>3</sub>;

MAP + CaCO<sub>3</sub>) proporcionaram incrementos na produtividade e no teor de P nos grãos da cultura em questão. Esses autores ainda relataram que o tratamento com aplicação de MAP em que essa fonte de P não apresentava Ca em sua composição apresentou resultados inferiores para todas as variáveis avaliadas e citadas anteriormente. O Ca desempenha função fundamental no crescimento e desenvolvimento das plantas, e no solo melhora a estrutura, a permeabilidade e a infiltração de água no solo (YAMADA e ABDALLA, 2007) e pode ter contribuído para que o SS se sobressaísse sobre as demais fontes de P. A fonte de Ca aliada ao P nos fertilizantes proporciona melhores condições para o desenvolvimento das plantas (RHEINHEIMER et al., 2000).

De maneira geral, a eficácia agronômica dos fosfatos em geral está intimamente ligada com a sua solubilidade (GOEDERT et al., 1986; SOUSA et al., 2002), tipo de solo, época, forma e uniformidade de aplicação do fertilizante, fatores esses que associados a umidade do solo, cultura empregada e manejo da lavoura podem ocasionar perdas de nutrientes e recursos financeiros (SOUSA e LOBATO, 2004). A escolha da fonte de fósforo de modo geral se baseia na eficiência em suprir o nutriente para as plantas quanto na relação custo-benefício da adubação (GOEDERT et al., 1986).

### **1.3 Formas de aplicação de fertilizantes fosfatados**

A forma como o fertilizante fosfatado é aplicado no solo pode influenciar a sua eficiência agronômica. As formas de aplicação mais utilizadas são: no sulco de semeadura, em cova, a lanço, na superfície, com ou sem incorporação e em faixas (SOUSA e LOBATO, 2003). O efeito da forma de aplicação do fertilizante na distribuição e absorção de P pelas plantas e as respostas em rendimento depende de fatores como: o sistema de cultivo, manejo e tipo de solo, nível de fertilidade, clima, fonte e dose do fertilizante, espécie a ser cultivada, espaçamento de plantio e distribuição radicular das culturas (ANGHINONI, 2004; PAVINATO e CERETA, 2004).

Na região do Cerrado é comum a aplicação de fertilizantes fosfatados via sulco de semeadura com fontes solúveis de P (NUNES et al., 2011). Alguns autores relataram que para a ocorrência adequada da absorção de P e elevada eficiência dos fertilizantes fosfatados, os mesmos devem ser aplicados de maneira adequada no solo, de preferência próximos das raízes das plantas (ANGHINONI e BARBER, 1980), assim como minimização da exposição do P ao fenômeno da fixação promovido por óxidos e hidróxidos de Fe e Al (NUNES et al., 2011).

Por outro lado, a aplicação a lanço destes fertilizantes é uma alternativa que vem permitindo maior rapidez na semeadura de soja e milho uma vez que esta pode ser realizada de forma antecipada ou após a semeadura, reduzindo o tempo para abastecer as semeadoras e aumentando a velocidade de trabalho por estarem mais leves. Conseqüentemente, tanto a primeira safra quanto a segunda se beneficiam com a redução de tempo gasto em operações favorecendo maior aproveitamento hídrico pelas culturas antes do final da estação chuvosa (NUNES et al., 2011; CASTOLDI et al., 2012; BARBOSA et al., 2015; OLIVEIRA, 2018). A distribuição do fertilizante a lanço diminui o risco de possíveis danos causados à germinação das sementes e estabelecimento das plantas, visto que as sementes não entram em contato direto com os fertilizantes (LACERDA et al., 2015). A aplicação a lanço dos fertilizantes fosfatados aumenta a superfície de contato desses com o solo o que pode trazer vantagem, como maior reatividade, principalmente quando aplicado os fosfatos naturais e os fosfatos naturais reativos. Mas também, pode a longo prazo, reduzir o efeito residual, proporcionando maiores perdas por adsorção específica e, ou, precipitação, quando aplicada as fontes solúveis como SS, ST e MAP.

A absorção de P pelas raízes depende da área total que está em contato com o fertilizante, e também da taxa de absorção por unidade de área, porém, a quantidade de P em contato com a superfície radicular depende do crescimento da raiz e do volume de solo submetido ao modo de aplicação (SANTOS, 2009). Diversos estudos têm sido realizados, buscando avaliar a forma mais eficiente de aplicação do fósforo no solo, porém, ainda não existe consenso nos resultados (RESENDE, 2013).

A aplicação localizada de fontes de P reduz temporariamente sua sorção pelo solo, contudo, diminui o volume de raízes em contato com este nutriente (ALVES et al., 1999), sendo está uma desvantagem que pode acarretar prejuízos em períodos de deficiência hídrica. Estudos reportaram maior eficiência dessa forma aplicação de P quando as doses a serem aplicadas são baixas, principalmente para fontes solúveis (FOX e KANG 1978; ANGHINONI e BARBER 1980). Esse tipo de aplicação pode favorecer a competição por outros nutrientes ou elementos benéficos, como os ânions molibdato e silicato, devido ao desenvolvimento das raízes nestas regiões, limitando o rendimento de matéria seca das plantas (SOUSA, 1980).

A aplicação a lanço propicia maiores perdas pela adsorção e, ou, precipitação, porém, há maior exploração do volume de solo pelas raízes, fator este extremamente importante durante os períodos de seca, resultando em maior acúmulo de P por unidade

de raiz, compensando a formação de resíduos não lábeis de P (KLEPKER e ANGHINONI, 1995; NOVAIS e SMYTH, 1999). As aplicações de fertilizantes fosfatados a lanço podem ser realizadas em casos específicos, ou seja, quando o solo já apresenta teores de P acima de níveis críticos (RANDALL e HOEFT 1988; BORDOLI e MALLARINO 1998). Sousa e Lobato (2004) explicaram que fato contribui para acelerar o processo de solubilização de fertilizantes de menor solubilidade. De maneira geral, ausência de resposta ao modo de aplicação é verificada em solos com elevados teores de P (HARGROVE, 1985; RANDALL e HOELF, 1988).

A eficiência da aplicação do fertilizante fosfatado pode estar relacionada ao teor de P inicial do solo. Conforme Welch et al. (1966) e Costa (2008) trabalhando com modo de aplicação de P na cultura do milho atribuíram que a eficiência relativa da aplicação destes fertilizantes a lanço ou no sulco está relacionada ao teor inicial de P no solo, pois quanto mais deficiente em P é o solo, maior o rendimento de grãos de milho com o P aplicado de forma localizada. Mas, no instante em que o teor de P foi aumentando essa eficiência foi diminuindo.

Segundo Rezende et al. (2006), os fosfatos solúveis por disponibilizarem prontamente o P, têm apresentado bons resultados independentes da forma de aplicação. Para Prado et al. (2001), a aplicação de fosfatos solúveis deve ser feita de forma localizada, na linha e/ou sulco de plantio ou semeadura, disponibilizando o adubo junto a raiz facilitando a absorção pelas plantas. Ao contrário dos autores citados anteriormente, Peryea (1990) afirmou que a adubação localizada de P proporcionou efeitos negativos sobre o crescimento inicial de árvores de maçã, o que pode ser atribuído à salinidade, na qual afetariam o crescimento de raízes. Barreto e Fernandes (2002) verificaram que plantas de milho adubadas com ST a lanço obtiveram produtividades maiores comparadas com adubações no sulco de plantio, sendo essa diferença atribuída à possível salinidade ou toxidez pela aplicação localizada da fonte de P.

Bergamin et al. (2008) estudando a influência do manejo da fertilização em condições de baixa disponibilidade de P no solo, verificaram que apesar do tratamento em linha de semeadura proporcionar maior número de vagens da soja, não houve diferença para a produtividade entre tratamentos a lanço e em linha de semeadura. Rossi et al. (2018) avaliando a aplicação de fertilizante fosfatado (sulco de semeadura, incorporado, a lanço após a semeadura) sob sistema de plantio direto e convencional na soja, observaram que as formas de aplicação não diferiram estatisticamente para variável produtividade nos sistemas de plantio.

Para Nunes (2014) solos com disponibilidade limitada de P, como em áreas recentemente abertas, a aplicação localizada no sulco é vantajosa no sistema de plantio direto, pela maior concentração do fertilizante próximo às raízes da planta e a lança com incorporação no sistema de plantio convencional, pelo maior volume de solo fertilizado, podendo inclusive ser feita antecipadamente (GUARESCHI et al., 2008). Como visto, ainda há muitas incertezas sobre a forma de aplicação, que proporcionará maior custo-benefício e melhor aproveitamento quanto ao uso de P pelas plantas.

#### **1.4 Fracionamento de fósforo**

Como já mencionado, o P no solo se encontra na forma orgânica (Po) e inorgânica (Pi) (LEITE et al., 2016). A forma como o P está disponível para as plantas pode ser afetado por fatores como uso e manejo do solo, P exportado na colheita, taxa de reposição de P exportado, habilidade das plantas em utilizar as formas menos lábeis de P (TAKAHASHI e ANWAR, 2007; TIECHER et al., 2012) e da própria adubação fosfatada (LEITE et al., 2016). Assim, a avaliação da dinâmica do P em solos pode ser realizada mediante o fracionamento químico do elemento no solo. O fracionamento de P tem sido utilizado para detectar a ação antrópica na dinâmica de P nos solos (CONTE et al., 2003), bem como a dinâmica de P no solo pode ser influenciada pelos fatores geoquímicos e biológicos (MIGNACCA, 2016).

A estimativa das formas de P no solo foi apresentada por Chang e Jackson (1957), em que a utilização de diferentes extratores poderia extrair as diferentes formas de P. Este método permite classificar o P no solo em fosfatos de alumínio (extrator:  $\text{NH}_4\text{Cl}+\text{NH}_4\text{F}$ ), fosfatos de ferro (extrator:  $\text{NaOH}$ ), fosfatos de cálcio (extrator:  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e fosfatos oclusos (extrator:  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7+\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ), porém, esse método não identifica separadamente as formas de Po e nem separa as formas de Pi quanto a labilidade das formas extraídas (GATIBONI, 2003). A partir da metodologia proposta Chang e Jackson (1957), outros métodos foram surgindo.

No Brasil os métodos de fracionamento de P no solo mais utilizados são os propostos por Chang e Jackson (1957), Hedley et al. (1982) e suas respectivas modificações (SOUZA FILHO, 2014). Dentre essas, destacam-se as modificações propostas por Condron e Goh (1989), Chen et al. (2000) e Tiessen e Moir (2008), que modificam o fracionamento de Hedley pela inclusão ou substituição de soluções extratoras.

Os métodos de fracionamento de P pressupõem a extração sequencial de uma mesma amostra de solo, por diversos reagentes e soluções extratoras com seletividade das formas de P, baseando-se na natureza e força das interações entre o P e suas fases (Po e Pi), além dos microrganismos (CONDRON e NEWMAN, 2011; GATIBONI et al., 2013).

No método de fracionamento proposto por Hedley et al. (1982) são adicionados extratores de menor a maior força de extração de forma sequencial, determinando as suas formas lábeis, pouco lábeis e não lábeis de P (MIGNACCA, 2016). Os extratores são resina de troca de ânions (RTA) que extraem as formas disponíveis de Pi (Pi-Resina); bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH 8,5) que extrai formas lábeis de Pi e Po; hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup>) que extrai Pi ligado aos óxidos de alumínio e ferro e às argilas silicatadas com energia de ligação intermediária, e o Po de formas moderadamente lábeis ligadas aos ácidos húmicos;  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup> aliada a ultrassonificação extrai as formas química e fisicamente protegidas nas superfícies internas dos microagregados; ácido clorídrico ( $\text{HCl}$  1,0 mol L<sup>-1</sup>) que extrai Pi contido nos fosfatos de cálcio é fortemente adsorvida, considerada de pouca labilidade; e a digestão do solo com ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) extraíndo o P residual do solo (Pi + Po) considerado não lábil (AMORIM, 2016; VIANA, 2016).

A divisão de formas lábeis, pouco e/ou moderadamente lábeis e não lábeis servem para demonstrar que há formas de P com maior ou menor capacidade de suprir P na solução do solo (SANTOS, J. et al., 2008; GATIBONI et al., 2013). Neste sentido, o agrupamento é feito conforme sua disponibilidade, em que o Pi extraído com  $\text{NaHCO}_3$  é sempre lábil para as plantas (SILVA, 2018). As formas de P extraídas pela RTA e  $\text{NaHCO}_3$ , apresentam correlação com a absorção de P pelas plantas, atuando na reposição de P na solução do solo (GATIBONI et al., 2007). Em solos pouco intemperizados há predominância de formas moderadamente lábeis (Pi e Po extraído com  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup>) que em solos bastantes intemperizados são considerados moderadamente lábeis (Pi e extraído com  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup>) (GUO e YOST, 1998). O P residual é dificilmente acessado em solos muito intemperizados (SILVA, 2018).

O comportamento dessas formas de P no solo são dependentes de diversos fatores como mencionado. Vários são os trabalhos que relatam a influência do sistema de manejo do solo (sistema de plantio direto (SPD) e sistema de plantio convencional (SPC)) como agentes da modificação da dinâmica do P no solo (TIECHER et al., 2012; NUNES, 2014). Diversos autores relatam aumento de formas lábeis de P em solo sob SPD quando

comparado ao SPC, atribuindo esse acréscimo ao acúmulo Po (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2003; TIECHER et al., 2012), Pi (NUNES, 2014) ou ambas (RODRIGUES et al., 2016) em frações de maior labilidade.

Conforme Roy et al. (2017), em solos sob SPC, a capacidade de adsorção de P em oxihidróxidos de ferro e alumínio pode ser bastante elevada. Enquanto no SPD o acúmulo de matéria orgânica no solo pode proporcionar o aumento da eficiência de fertilizantes fosfatados (NUNES, 2014), permitindo o acúmulo de Pi em formas mais lábeis em camadas superficiais devido a competição das substâncias orgânicas com o fosfato pelos sítios de adsorção (FU et al., 2013).

A adubação fosfatada é outro fator que pode alterar a dinâmica do P no solo. Carneiro et al. (2011) verificaram em seu estudo que as aplicações de P aumentaram as formas de Po e Pi no solo, sendo que as formas de Pi foram maiores em solos sob cultivo (feijão e braquiária) e adubação fosfatada enquanto as formas de Po foram maiores sob adubação fosfatada em áreas sem cultivo (vegetação de cerrado nativo). Oliveira (2019) avaliando a dinâmica do P no solo após a adubação com fertilizante fosfatado protegido com polímeros mediante fracionamento, verificou que o fertilizante fosfatado com polímeros apresentou maior disponibilidade de P lábil e moderadamente lábil em relação a ausência do polímero. Silva (2018) estudando a reatividade e disponibilidade das formas de P no solo em pastagem consorciada na presença ou ausência de adubação com superfosfato triplo (ST) e fosfato reativo de Bayóvar, observou maiores teores de P extraído pela RTA com aplicação de superfosfato triplo do que com fosfato reativo de Bayóvar na camada de 0,10 a 0,20 m. O autor relatou ainda, que as fontes de P aliadas ao consórcio ou adubação nitrogenada favorecem a redistribuição de P menos lábeis para mais lábeis em solos arenosos.

Beutler et al. (2015) avaliando o fracionamento do P relataram que solos sob sistema lavoura-pecuária contribuem para a formação de P lábil, moderadamente lábil e moderadamente resistente do que solos sob pastagem e vegetação natural. Segundo os autores, o Pi foi maior em áreas sob altas doses de fertilizante fosfatado, enquanto o Po prevaleceu em áreas com menor ou nula influência antrópica. Conte et al. (2003) estudando as frações preferenciais de acumulação de P em função das doses de ST ao solo no SPD, afirmaram que o aumento na dose do fertilizante aplicado proporcionou incremento nas frações mais lábeis de Pi no teor total, enquanto o Po diminuiu com a adição do fertilizante.

Pelo fracionamento de P no solo é possível determinar o comportamento deste nutriente no solo, bem como verificar se ele está prontamente disponível para as plantas ou não. Portanto, o estudo da dinâmica do P no solo é importante para a tomada de decisões quanto à forma de aplicação e fonte da adubação fosfatada a ser adotada.

## 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. M. C.; MAGALHÃES, J. V.; VASCONCELLOS, C. A.; NOVAIS, R. F.; BAHIA FILHO, A. F. C.; FRANÇA, G. E.; OLIVEIRA, C. A.; FRANÇA, C. C. M. Acúmulo de nitrogênio e de fósforo em plantas de milho afetadas pelo suprimento parcial de fósforo nas raízes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 299-305, 1999.

AMORIM, A. P. **Uso de indicadores químicos na avaliação da qualidade de um Argissolo Vermelho Amarelo distrocoeso em um sistema de cultivo em aleias**. Tese (Doutorado em Biodiversidade e Conservação) - Universidade Federal do Amazonas/Maranhão, São Luís, 111 p. 2016.

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 537-562.

ANGHINONI, I.; BARBER, S. A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agronomy Journal**, v. 72, p. 685-688, 1980.

BARBOSA, N. C.; ARRUDA, E. M.; BROD, E.; PEREIRA, H. S. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**, v. 31, p.87-95, 2015.

BARRETO, A. C.; FERNANDES, M. F. Produtividade e absorção de fósforo por plantas de milho em função de doses e modos de aplicação de adubo fosfatado em solo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 151-156, 2002.

BARROW, N.J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal Soil Science**, v. 34, p. 733-750, 1983.

BAZANI, J. H. **Eficiência de fertilizantes solúveis e poucos solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Dissertação

(Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 129 p. 2014.

BERGAMIN, A. C.; SCHLINDWEIN, J. A.; VENTUROSO, L. R.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; CARON, B. O.; SCHMIDT, D. Respostas de duas cultivares de soja à adubação a lanço e em sulco, no Município de Rolim de Moura/RO. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 50, p. 155-166, 2008.

BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Humic substances and phosphorus fractions in areas with crop-livestock integration, pasture and natural cerrado vegetation in Goiás, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 18, p. 11-25, 2015.

BOLLAND, M. D. A.; BOWDEN, J. W. Long-term availability of phosphorus from calcined rock phosphate compared with superphosphate. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 33, p. 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**, v. 90, p. 27-33, 1998.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3.ed. PortoAlegre: Bookman, 2013. 704 p.

CARNEIRO, L. F.; RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, J. Z. L.; CURI, N.; REIS, T. H. P.; VALLE, L. A. R. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 483-491, 2011.

CARRINGTON, D. **Phosphate fertiliser 'crisis' threatens world food supply**. 2019. London: The Guardian. Disponível em <<https://www.theguardian.com/environment/2019/sep/06/phosphate-fertiliser-crisis-threatens-world-food-supply>>. Acesso em 19 de set. de 2020.

CASTOLDI, G.; FREIBERGER, M. B.; CASTOLDI, G.; COSTA, C. H. M. Manejo da adubação em sistema plantio direto. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 6, p. 62-74, 2012.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, v. 84, p. 133-144, 1957.

CHIEN, S. H.; SALE, P. W. G.; FRIESEN, D. K. A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in the solubility. **Fertilizer Research**, v. 24, p. 149-157, 1990.

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

CONDRON, L. M.; NEWMAN, S. revisiting the fundamentals of phosphorus fractions of sediments and soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, p. 830-840, 2011.

CONDRON, L. M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. (Eds.). **Organic Phosphorus in the Environment**. Wallingford: CAB International, 2005. p. 295-307.

CONTE, E.; ANGHINONI, I. & RHEINHEIMER, D. S. Frações de fósforo em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 893-900, 2003.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. IN: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo**. 1 ed. v. 1. Viçosa: SBCS. 2009. p. 505-572.

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 (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 106 p. 2008.

DAHER, E. Balanço de Nutrientes na Agricultura Brasileira. IN: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. Nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, v. 2, p. 355-362. 2014.

ESSINGTON, M. E. **Soil and water chemistry - na integrative approach**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 534 p.

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

FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MORAES, R. P.; Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1907-1914, 2010.

FOX, R. L.; KANG, B. T. Influence of phosphorus fertilizer placement and fertilization rate on maize nutrition. **Soil Science**, v. 125, p. 34-40, 1978.

FU, Z.; WU, F.; SONG, K.; LIN, Y.; BAI, Y.; ZHU, Y.; GIESY, J. P. Competitive interaction between soil-derived humic acid and phosphate on goethite. **Applied Geochemistry**, v. 36, p. 125-131, 2013.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 231 p. 2003.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G. RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. fracionamento químico das formas de fósforo do solo: Usos e Limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 141-187.

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

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

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. Avaliação preliminar de fosfatos com acidulação parcial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 10, p. 75- 80, 1986.

GUARESCHI, R. F.; GAZOLLA, P. R.; SOUCHIE, E. L.; ROCHA, A. C. Adubação fosfatada e potássica na semeadura e a lanço antecipada na cultura da soja cultivada em solo de Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, p. 769-774, 2008.

GUO, F.; YOST, R. S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pool of differing availability. **Soil Science**, v. 163, p. 822-833, 1998.

GYANESHWAR, P.; KUMAR, G. N.; PAREKH, L. J.; POOLE, P. S. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. **Plant Soil**, v. 245, p. 83-93, 2002.

HANSEL, F. D. **Fertilizantes fosfatados aplicados a lanço e em linha na cultura da soja sob semeadura direta**. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 74 p. 2013.

HARGROVE, W. L. influence of tillage on nutriente uptake and yield of corn. **Agronomy Journal**, v. 77, p. 763-768,1985.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p. 665-688.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais em sistemas de cultivo**. Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. 31 p. (Boletim Técnico, 3).

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**, v. 19, p. 395-401, 1995.

LACERDA, M. C.; NASCENTE, A. S.; CARVALHO, M. C. S.; MONDO, V. H. V. **Aplicação a lanço de fertilizante mineral em sistema de produção de feijão-comum irrigado no Cerrado**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão (Comunicado técnico, 232), 2015. 6 p.

LOPES, A. S.; DAHER, E.; BASTOS, A. R. R.; GUILHERME, L. R. G. Suprimentos e extensão das reservas de nutrientes no Brasil. IN: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. Nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, v. 2. p. 283-305, 2014.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; CUNHA, J. F. **Superfosfato Simples**. São Paulo: Gráfica Nagy, 2010.

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q; KORNDORFER, G. H. Curvas de disponibilidade de P em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v. 27, p. 70, 2011.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 594 p.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012, 651 p.

MIGNACCA, F. A. **Fracionamento de fósforo de um Argissolo Vermelho distroférico submetido a manejos de correção e adubação em sistema de integração lavoura-pecuária**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 73 p. 2016.

NASCENTE, A. S.; COBUCCI, T.; SOUSA, D. M. G.; LIMA, D. P. Adubação fosfatada no sulco e foliar afetando a produtividade de grãos do feijoeiro comum. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, p. 1231- 1240, 2014.

NASCIMENTO, K. P. M.; GALVÃO, J. R.; ALVES, K. F.; BARBOSA, M. F.; VIANA, T. C.; JESUS, A. M. B. S.; LIMA, L. M.; OLIVEIRA, C. A. G. Fontes fosfatadas e micronutrientes são relevantes na cultura do milho. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, p. 1-14, 2019.

NICCHIO, B. **Eficiência agrônômica de fontes alternativas de fósforo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Uberlândia, Uberlândia, 109 p. 2015.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 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. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 471-537.

NUNES, R. S. **Eficiência de uso do fósforo em sistemas de manejo do solo e adubação fosfatada por um longo período**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 150 p. 2014.

NUNES, R. S.; SOUSA, D. M. G.; GOEDERT, W. J.; VIVALDI, L. J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.877-888, 2011.

OLIVEIRA, C. L. B. **Adubação fosfata com polímeros em soqueira de cana-de-açúcar: efeito da labilidade de fósforo no solo e na produtividade**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Animal) - Universidade Estadual Paulista, Dracena, 76 p. 2019.

OLIVEIRA, L. E. Z. **Biodisponibilidade de fósforo residual em diferentes manejos de solo e adubação**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 83 p. 2018.

PAVINATO, P. S.; CERETA, C. A. Fósforo e Potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, v. 34, p. 1779-1784, 2004.

PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos a partir de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 911-920, 2008.

PAVINATO, P. S. **Dinâmica do fósforo no solo em função do manejo e da presença de resíduos em superfície**. Tese (Doutorado em Agronomia-Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 145 p. 2007.

PERYEA, F. J. Phosphate-fertilizer-induced sal toxicity of newly planted apple trees. **Soil Science Society of American Journal**, v. 54, n. 6, p. 1778-1783. 1990.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; ROQUE, C. G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 85-92, 2001.

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

RAIJ, B. van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, J. H.; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, v. 57, p. 77-159, 1996.

RAMOS, S. J.; FAQUIN, V.; RODRIGUES, C. R.; SILVA, C. A.; BOLDRIN, P. F. Biomass production and phosphorus use of forage grasses fertilized with two phosphorus sources. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 335-343, 2009.

RANDALL, G. W.; HOEFT, R. G. Placement methods for improved efficiency of P and K fertilizers: A review. **Journal of Production in Agriculture**, v. 1, p. 70-79, 1988.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. Tradução: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.

RESENDE, A. V. **Adubação fosfatada e a lanço é prática de manejo sustentável?**. 2013. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=79YNwZ-g5YM>>. Acesso em: 06 abr. 2020.

RESENDE, A. V., FURTINI NETO, A. E., ALVES, V. M. C., MUNIZ, J. A., CURI, N., FAQUIN, V., 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**, v. 30, p. 453-466, 2006.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 589-597, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 41-49, 2003.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P.S.; WITHERS, P.J.A.; TELES, A.P.B.; HERRERA, W.F.B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1050-1061, 2016.

ROSSI, N. G.; VILAR, C. C.; USHIWATA, S. Y.; REIS, R. G. E.; NABEIRO, J. C. X. Influência do modo de aplicação de fertilizante fosfatado na produção de soja em sistema de plantio direto e convencional no cerrado. **Global Science and Technology**, v. 11, p. 101-111, 2018.

ROY, E. D.; WILLIG, E.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; VAZQUEZ, F. F.; PEGORINI, L.; SPERA, S. A.; PORDER, S. Soil phosphorus sorption capacity after three decades of intensive fertilization in Mato Grosso, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 249, p. 206-214, 2017.

SANTOS J. Z. L.; FURTINI A. E. N.; RESENDE A. V.; CURI N.; L. F.; COSTA, S. E. V. G. A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, p. 705-714, 2008.

SANTOS, D. B. M. **Distribuição do fósforo no perfil do solo sob sistema de plantio direto**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 81 p. 2009.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, p. 576-586, 2008.

SANTOS, L. S. **Variabilidade do fósforo extraído causada pela variação analítica nos métodos Mehlich-1 e 3**. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 79 p. 2013.

SILVA, A. P. L. **Fracionamento de fósforo em pastagem solteira e consorciada com fontes de fósforo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 63 p. 2018.

SILVA, M. C. **Eficiência agrônômica de fosfatos reativos sob diferentes formas de manejo de adubação**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Goiás, Goiânia, 80 p. 2011.

SILVA, T. O.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; PALUDO, V. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, p. 1315-1326, 2011.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado**. Piracicaba: POTAFOS, 2003. 16 p. (Informações Agronômicas, 102).

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. p. 147-168.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. (Eds). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA FILHO, L. F. S. **Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola**. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 127 p. 2014.

STAUFFER, M. D.; SULEWSKI, G. Fósforo – essencial para a vida. In: YAMADA, T. ABDALLA, S. R. S. (Eds). **Simpósio sobre fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 1-12.

TAKAHASHI, S.; ANWAR, M. R. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, v. 101, p. 160-171, 2007.

TAYLOR, A. W.; GURNEY, E. L.; LINDSAY, W. L. An evaluation of some iron and aluminium phosphates as sources of phosphate for plants. **Soil Science**, v. 90, p. 25–31, 1960.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 271-281, 2012.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (Eds.). **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton, CRC Press, 2008. p. 293-306.

VELOSO, C. A. V.; SILVA, A. R.; CARVALHO, E. J. M.; SLVEIRA FILHO, A. **Produção de grãos de milho sob manejo da adubação fosfatada em Latossolo amarelo distrófico no Oeste Paraense.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 17 p.

VIANA, T. O. **Frações de fósforo sob diferentes usos e classes de solo da Região Sul da Bahia.** Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 88 p. 2016.

VOGEL, P. T. **Estratégias de aplicação e fontes de fertilizantes na cultura da soja.** Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 56 p. 2014.

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**, v. 58, p. 283-287, 1966.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. D. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to Sustainable Management of Phosphorus in Brazilian Agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1-13, 2018.

YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. **Informações recentes para otimização da produção agrícola.** Informações Agronômicas, n. 117, p. 1-28, 2007.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Geral**

- Avaliar a dinâmica do fósforo no solo e a produtividade da soja sob fontes de fertilizantes fosfatados e suas formas de aplicação.

#### **3.2 Específicos**

- Avaliar a eficiência agronômica das fontes de fertilizantes fosfatados em função da forma de aplicação na cultura da soja;

- Avaliar a influência das fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados sobre a nutrição fosfatada e a produtividade da soja;

- Quantificar a produção de restos culturais após as safras;

- Quantificar o balanço de P entre as safras;

- Quantificar o teor de fósforo exportado para o grão de soja;

- Avaliar a influência das fontes de fertilizantes fosfatados e forma de aplicação sobre a dinâmica do P no solo mediante o fracionamento.

## CAPÍTULO I

### **FERTILIZANTES FOSFATADOS APLICADOS NA LINHA DE SEMEADURA E A LANÇO EM DUAS SAFRAS DE SOJA EM LATOSSOLO DO CERRADO DE ELEVADA FERTILIDADE**

## RESUMO

A eficiência da adubação fosfatada pode ser afetada pelas fontes de fósforo, formas de aplicação, características do solo, e espécies vegetais. O objetivo deste estudo foi avaliar as respostas da cultura da soja sob diferentes fontes de fertilizantes fosfatados e suas formas de aplicação. O experimento foi realizado em solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico. A área experimental possui histórico de cultivo de soja de quatro safras (2014/2015, a 2017/2018), com aplicação na linha e a lanço de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados. Este experimento apresenta resultados das safras 2016/2017 e 2017/2018. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso em esquema fatorial  $4 \times 2 + 1$  sendo, quatro fontes de fósforo (superfosfato simples e triplo, monoamônio fosfato e fosfato reativo) e duas formas de aplicação (na linha de semeadura e a lanço) e o controle (sem adubação fosfatada). As variáveis avaliadas foram à altura das plantas, peso de mil grãos, rendimento de grãos e de restos culturais, eficiência agrônômica, teor de fósforo nos grãos no estágio R1, teor de fósforo nos restos culturais e no solo. Nas condições deste estudo a adubação fosfatada proporcionou incremento nas características avaliadas, enquanto as formas de aplicação dos fertilizantes não foram tão responsivas. Ainda para este estudo, as fontes que apresentaram melhores resultados foram superfosfato simples e superfosfato triplo.

**PALAVRAS-CHAVES:** Superfosfato simples, superfosfato triplo, monoamônio fosfato, fosfato reativo, adubação a lanço, adubação na linha.

## ABSTRACT

The efficiency of phosphate fertilization can be affected by phosphorus sources, application forms, soil characteristics, and plant species. The aim of this study was to evaluate the responses of soybean crops under different phosphate fertilizers sources and their forms of application. The experiment was carried out in soil classified as Red Dystrophic Latosol. The experimental area has a history of growing soybeans from four harvests (2014/2015, 2017/2018), with application in the line and haul of different sources of phosphate fertilizers. This experiment presents results for the 2016/2017 and 2017/2018 crops. The experimental design was a randomized block in a  $4 \times 2 + 1$  factorial scheme, being four sources of phosphorus (single and triple superphosphate, monoammonium phosphate and reactive phosphate) and two forms of application (in the sowing line and the haul) and the control (without phosphate fertilization). The variables evaluated were plant height, weight of a thousand grains, yield of grains and crop residues, agronomic efficiency, phosphorus content in grains at stage R1, phosphorus content in crop remains and soil. Under the conditions of this study, phosphate fertilization provided an increase in the evaluated characteristics, while the application forms of fertilizers were not as responsive. Also for this study, the sources that showed the best results were single superphosphate and triple superphosphate.

**Keywords:** Simple superphosphate, triple superphosphate, monoammonium phosphate, reactive phosphate, haul fertilization, in-line fertilization.

## 1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max*) é a principal cultura cultivada durante o período de safra em solos do Cerrado brasileiro. Estes solos são muito intemperizados e apresentam características oxídicas com elevada fixação/adsorção do fósforo (P), resultando na baixa disponibilidade deste nutriente para as culturas (NOVAIS e SMYTH, 1999; SOUSA et al., 2016) este fato aliado às exigências de quantidades consideráveis de fertilizantes fosfatados, torna imprescindível o estabelecer qual fonte e forma de aplicação de P (BARBOSA et al., 2015; BARBOSA et al., 2017, WITHERS et al., 2018) que poderá garantir o uso eficiente e incrementos na produção.

Todavia, nos últimos anos o paradigma da adubação fosfatada, não está ligado em estabelecer somente doses para atender à necessidade das plantas, e do dreno solo, mas também está relacionado à escolha adequada da fonte, bem como de sua forma de aplicação. Logo, tanto a fonte quanto a forma de aplicação também são alvos de grande interesse quando se pensa em reduzir os custos de produção e em busca da sustentabilidade do sistema de produção. Sabe-se que o P limita a produtividade da soja, porém, seu custo é alto para o produtor, e a eficiência agronômica é baixa na atual conjuntura (SANTINI et al., 2019). Sendo assim, torna-se importante os estudos que visem identificar qual fonte e qual forma de aplicação desses fertilizantes à base de P que resultarão em maior eficiência agronômica e produtividade para as culturas.

A reposição de P no solo é feita via adubação com fontes fosfatadas de alta e/ou baixa solubilidade. As fontes mais utilizadas atualmente na agricultura brasileira são os fosfatos solúveis (SS, ST, MAP), os termofosfatos, os multifosfatos e os fosfatos naturais (LARA et al., 2017). Porém a eficiência desses fertilizantes varia de acordo com: o tipo de solo, a técnica de aplicação, as características intrínsecas dos mesmos, com a própria cultura e os fatores ambientais (FRANDOLOSO et al., 2010; SOUSA e LOBATO, 2003).

Os fertilizantes fosfatados solúveis, como o ST tem apresentado maior eficiência na disponibilidade de P e conseqüente incremento na produção de massa seca e no teor de P no tecido de plantas, quando comparado com fosfatos naturais (RAMOS et al., 2009; SILVA et al., 2009; FRANDOLOSO et al., 2010; FONTOURA et al., 2010; SILVA et al., 2011). Os fosfatos reativos naturais (FR) são insolúveis em água e com média solubilidade em ácido cítrico, podendo resultar em menor eficiência agronômica para culturas anuais no primeiro ano de cultivo (SOUSA e LOBATO, 2004). Entretanto, os

FR por apresentarem uma solubilização mais lenta, podem aumentar gradativamente a disponibilidade de P no solo a longo prazo (LARA et al., 2017). Todavia, para a cultura da soja, em função do alto dreno de Ca pela planta, os fosfatos reativos podem proporcionar eficiência semelhante ao dos fosfatos acidulados (NOVAIS e SMYTH, 1999), uma vez que os FR possuem Ca na sua composição.

As formas de aplicação dos fertilizantes fosfatados também podem influenciar na sua eficiência. A aplicação na linha de semeadura é uma técnica tradicional na implantação de grandes culturas, contudo, pela necessidade de um ganho operacional para implantação da segunda safra (safrinha), o produtor tem optado pela adubação a lanço. Porém, ainda são poucos os estudos que relatam a eficiência desta técnica de manejo para com os fertilizantes fosfatados.

Alves et al. (1999) relataram que a forma convencional de aplicação na linha reduz temporariamente a sorção de P no solo, mas como desvantagem concentra o volume de raiz próximo ao fertilizante, sendo um fator limitante para o desenvolvimento da cultura durante déficit hídrico. Já aplicação a lanço pode favorecer perdas por adsorção, mas, tem-se a exploração de um volume maior do solo pelas raízes, o que implica em maior acúmulo de P por unidade raiz compensando as perdas pela formação de fósforo não lábil, além de ser um fator preponderante em épocas de estiagens (NOVAIS e SMYTH, 1999). Conforme citaram Sousa e Lobato (2004), para fontes de P de baixa solubilidade, o mais adequado é aplicação a lanço seguido de incorporação no solo, podendo assim, acelerar o processo de solubilização. Já para adubos fosfatados com maior solubilidade, recomenda-se adubação no sulco de plantio ou linha de semeadura (MOTOMIYA et al., 2004), que aumentaria a concentração de P no local de adubação favorecendo o desenvolvimento da cultura.

Neste sentido, o estudo da eficiência de uso do P mediante o emprego de adubos fosfatados envolve a avaliação do balanço entre entradas e saídas de P no sistema, em função da fonte e modo de aplicação do fertilizante e do sistema de manejo do solo (ANGHINONI, 2004). O manejo da adubação deve favorecer a absorção e diminuir a fixação pelo solo, aumentando o aproveitamento de P pelas plantas (NOVAIS e SMYTH, 1999).

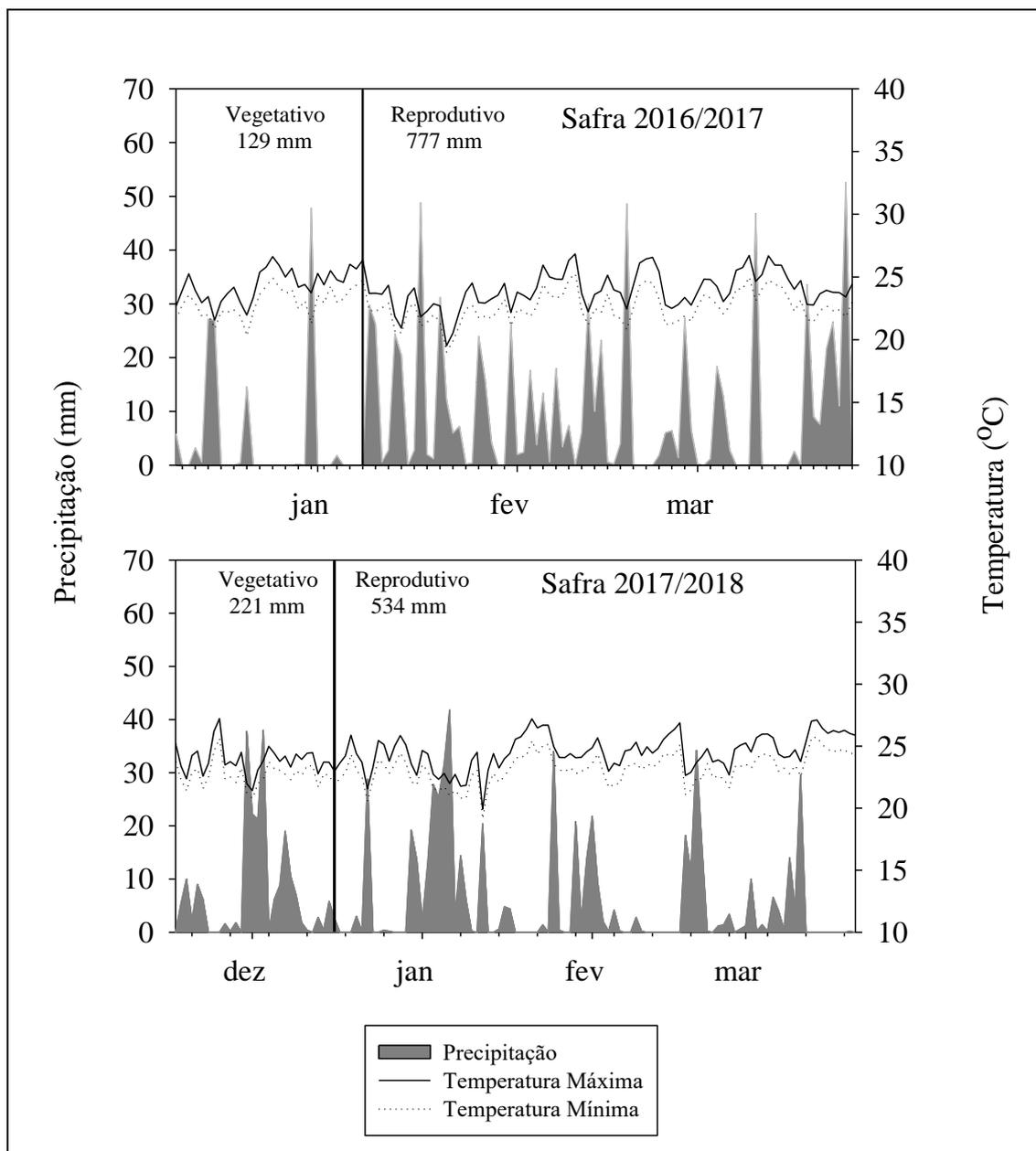
Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de fontes de fertilizantes fosfatos e formas de aplicação (na linha de semeadura e a lanço) em um Latossolo Vermelho Distrófico, e o efeito desses tratamentos sobre a produtividade da soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em campo no município de Rio Verde-GO. O histórico de uso da área com respectivas culturas foi descrito a seguir: antes do ano de 2014 a área se encontrava sob pastagem de braquiária com alta produtividade e uso de doses elevadas de fertilizantes e corretivos; na safra de 2014/2015, efetuou-se análise química do solo para correção do solo e adubação para o cultivo de soja (COUTO, 2018); e safrinha com sorgo forrageiro no ano de 2015 (BARBOSA et al., 2017), já na safra de 2015/2016 efetuou-se plantio de soja (COUTO, 2018). Sendo assim, a partir da safra de soja 2014/2015 foram aplicados os tratamentos com diferentes fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados (COUTO, 2018). O atual trabalho é continuação das pesquisas desenvolvidas por Couto (2018) e Barbosa et al. (2017), com duas safras subsequentes com a cultura da soja em 2016/2017 e 2017/2018. Entre as safras de 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018 a área foi mantida sob pousio com o desenvolvimento de plantas espontâneas. Vale ressaltar que os dados coletados neste experimento se referem as duas safras: 2016/2017 e 2017/2018. Após a primeira safra (2014/2015) foi realizado o monitoramento da fertilidade do solo através das análises químicas para demais safras.

O clima da região é classificado como Tropical Úmido (Aw), com inverno seco e verão chuvoso (KÖPPEN, 1931). Foram anotadas a precipitação total mensal e as temperaturas médias mensais de janeiro de 2016 a dezembro de 2018 (Figura 1).

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico equivalente aos Ferrasols na WRB/FAO e aos Oxisols na Soil Taxonomy (EMBRAPA, 2018). Realizou-se a abertura de um perfil para descrição das características morfológicas do solo (Tabela 1) (LACERDA FILHO et al. (1999). Em cada parcela foram coletadas amostras de solo na camada de 0 a 0,10 m de camada para a caracterização da área experimental antes da semeadura da soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018 (Tabela 2). Coletou-se o solo nessa camada devido os trabalhos anteriores não apresentarem movimentação do P em camadas mais profundas. A granulometria do solo na camada de 0 a 0,20 m de camada foi: 36,73% de areia, 55,64% de argila e 7,63% de silte (COUTO, 2018).



**Figura 1.** Precipitação total mensal (mm) e Temperatura máxima e mínima mensais (°C) durante as safras 2016/2017 (10 de dezembro de 2016 a 24 de março de 2017) e 2017/2018 (17 de novembro de 2017 a 21 de março de 2018). Rio Verde, Goiás, Brasil.

O delineamento experimental empregado foi em blocos ao acaso em esquema fatorial  $4 \times 2 + 1$  sendo, quatro fontes de fósforo (Fosfato Reativo de Marrocos (FR) – 30% de  $P_2O_5(CNA+H_2O)$ ; Monoamônio Fosfato (MAP) 52% de  $P_2O_5(CNA+H_2O)$ ; Superfosfato Simples (SS) – 21%  $P_2O_5(CNA+H_2O)$  e o Superfosfato Triplo (ST) 46%  $P_2O_5(CNA+H_2O)$ ), aplicados na linha de semeadura e a lanço, e o um tratamento controle (sem adubação fosfatada), com quatro repetições. As parcelas consistiam de 10 linhas de soja espaçadas a 0,5 m, contendo 5 metros de comprimento por 5 metros de largura, perfazendo uma área de 25 m<sup>2</sup>. Para as avaliações foram descartadas duas linhas e 1 metro

de cada extremidade da parcela, perfazendo uma área útil de 3 m de largura por 3 m de comprimento, totalizando 9 m<sup>2</sup>.

**Tabela 1.** Características morfológicas dos horizontes pedogenéticos do Latossolo Vermelho Distrófico correlato aos Oxisols na Soil Taxonomy e aos Ferrasols (Ferrasoles) na WRB/FAO.

Local:	Rio Verde, GO	
Coordenadas:	17°48'22" S, 50°54'56" W	
Relevo local:	suave ondulado próximo a corpo d'água	
Altitude:	738 m	
Litologia <sup>1</sup> :	Basalto toleítico, cinza escuro a esverdeado, com intertrapes de arenito fino a muito fino com estratificações cruzadas tangenciais de pequeno porte <sup>1</sup> .	
Formação Geológica <sup>1</sup> :	Grupo São Bento, Formação Serra Geral <sup>1</sup>	
Período Geológico <sup>1</sup> :	Juro-Cretáceo (final do Jurásico e Início do Cretáceo)	
Vegetação:	Floresta semicaducifólia em transição para cerrado	
Erosão:	Ausente	
Drenagem:	Boa	
Uso atual:	Agricultura	
Clima (Köppen) <sup>2</sup> :	Aw, com temperatura média anual de 23,3°C e 1663 mm de precipitação média anual.	
Descrito por:	Carlos Ribeiro Rodrigues	
Horizonte	Camada (m)	Características
A (Húmico)	0 – 0,2	Horizonte mineral, diferenciando-se do horizonte subsequente pelo maior teor de matéria orgânica. Cor Vermelho-escuro acinzentado (cor 10R 3/3 seco, 10R 3/4 macerado seco, 10R 3/2 úmido e 10R 3/2 macerado úmido); textura argilosa; estrutura de blocos angulares 0,05 – 0,20 m e presença de poros.
Nitossólico	0,2 – 0,60	Horizontes mineral, Bruno-avermelhado-escuro (2.5YR 3/4 seco, 2.5YR 3/4 macerado seco, 2.5YR 3/3 úmido, 2.5YR 3/3 macerado úmido); textura argilosa; estrutura de blocos subangulares 0,05 – 0,10 m duro e coeso e cerosidade nítida, presença de pequenas linhas de concreções ferruginosas.
Transição	0,60 – 1,60	Bruno-avermelhado-escuro (2.5YR 3/4 seco, 2.5YR 3/4 macerado seco, 2.5YR 3/3 úmido, 2.5YR 3/3 macerado úmido), presença de cascalho ferruginoso na linha de transição; magnetita; estrutura em blocos duro e coeso; presença de cerosidade.
B (Latossólico)	1,60 – 2,00	Bruno-avermelhado-escuro (2.5YR 3/4 seco, 2.5YR 3/4 macerado seco, 2.5YR 3/3 úmido, 2.5YR 3/3 macerado úmido); textura média argilosa; estrutura granular e presença de poros.

<sup>1</sup>Fonte: LACERDA FILHO et al. (1999).

<sup>2</sup>Clima Rio Verde (2020).

Nas safras 2016/2017 e 2017/2018 foram aplicados 100 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectare de cada fonte de P e 60 kg de K<sub>2</sub>O por hectare. Além de P e K, na safra 2017/2018, aplicou-se 2 kg ha<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 2 kg ha<sup>-1</sup> de CuSO<sub>4</sub>, 6 kg ha<sup>-1</sup> de MnSO<sub>4</sub> e 6 kg ha<sup>-1</sup> de ZnSO<sub>4</sub>. As recomendações de adubação foram realizadas conforme a recomendação para a cultura da soja no cerrado (SOUSA e LOBATO, 2004).

Descrever sobre a correção da acidez do solo, foi feita apenas no início geral dos cultivos, e que ao longo das demais safras não foi necessário, pois os teores de Ca e Mg estavam elevados e o pH estava na faixa considerada adequada para o cultivo da soja.

A semeadura da soja, cultivar MSOY7110 IPRO R2 foi realizada no dia 10 de dezembro de 2016 (safra 2016/2017). O cultivar utilizado apresentava ciclo superprecoce de 102 a 112 dias. Na safra seguinte (2017/2018) semeou-se o cultivar POWER 73170 RSF IPRO no dia 17 de novembro de 2017, cultivar de ciclo semiprecoce de 118 a 115 dias. Ambos cultivares foram semeados na densidade de 24 plantas por metro linear em cada parcela para ambas as safras, sendo os tratamentos culturais mantidos de forma comum a todos os tratamentos, conforme a necessidade e a recomendação para a cultura da soja.

Em ambas as safras, no estágio R1 foram coletadas 30 folhas na área útil de cada parcela para diagnose do teor de P foliar ( $\text{g kg}^{-1}$ ). Foi coletado o trifólio e retirado o pecíolo, lavadas em água destilada, secas em papel toalha e acondicionadas em sacos de papel craft previamente identificados, e secos em estufa de circulação forçada de ar a 65 a 70°C até peso constante. Em seguida, o material foi moído em moinho tipo Willey e destinado a análise química de tecido. A extração foi realizada através de digestão via seca em mufla a 500°C e a determinação por colorimetria através do desenvolvimento da cor azul com molibdato de amônio (MALAVOLTA et al., 1997). No período de realização do experimento não houve a necessidade de corrigir a acidez do solo (Tabela 2).

**Tabela 2.** Caracterização química do solo na camada de 0,0 – 0,10 m antes da semeadura da soja nas safras de 2016/2017 e 2017/2018.

Tratamentos	pH <sup>1</sup> H <sub>2</sub> O(1:2,5)	P-MI mg dm <sup>-3</sup>	Classificação <sup>2</sup>	P(NH <sub>4</sub> Cl) -----mg dm <sup>-3</sup> -----	K-MI	Ca	Mg	H+Al ----cmolc dm <sup>-3</sup> ----	MOS g dm <sup>-3</sup>
Safrá 2016/2017									
FR <sup>3</sup> -lanço	5,4	10,3	Adequado	10,9	200,0	3,8	2,2	5,6	52,3
FR-linha	5,4	7,0	Médío	8,2	262,5	3,3	2,5	5,4	53,0
MAP-lanço	5,4	6,7	Médío	5,5	148,5	2,9	2,3	5,5	47,8
MAP-linha	5,4	4,9	Baixo	5,9	178,7	2,7	2,1	5,5	46,2
SS-lanço	5,3	6,2	Médío	6,4	133,7	4,6	2,2	5,8	48,3
SS-linha	5,5	12,1	Alto	6,6	157,5	3,3	2,0	5,7	48,6
ST-lanço	5,5	8,5	Adequado	6,3	253,8	3,6	2,5	5,7	56,2
ST-linha	5,6	4,1	Baixo	8,3	352,5	3,4	2,3	5,8	52,1
Controle	5,4	3,9	Baixo	4,4	171,3	3,3	2,4	5,6	50,7
Safrá 2017/2018									
FR-lanço	5,8	11,3	Adequado	11,7	231,4	4,8	3,1	4,4	50,2
FR-linha	5,9	8,1	Adequado	14,1	227,5	5,0	3,3	4,3	50,5
MAP-lanço	5,8	9,2	Adequado	13,8	236,3	3,6	2,7	3,5	44,4
MAP-linha	5,8	5,6	Médío	12,1	292,5	3,3	2,5	3,5	44,3
SS-lanço	5,8	6,5	Médío	8,3	220,0	4,3	2,6	3,4	45,7
SS-linha	5,9	12,9	Alto	10,0	227,5	4,7	2,6	4,4	47,2
ST-lanço	5,8	9,1	Adequado	14,7	250,0	3,9	2,7	3,5	53,9
ST-linha	5,8	5,9	Médío	13,4	396,3	4,1	2,5	3,5	49,5
Controle	5,9	5,2	Médío	13,0	293,8	3,3	2,6	3,2	48,7

<sup>1</sup> pH - potencial hidrogeniônico em H<sub>2</sub>O com relação solo:extrator 1:2,5 (EMBRAPA, 2009); P-MI e K-MI = Fósforo (P) e potássio (K) disponíveis extraído pelo método Mehlich I, com a determinação do P por colorimetria com desenvolvimento da cor azul na presença de ácido ascórbico e K determinado por fotometria de chama (EMBRAPA, 2009); P(NH<sub>4</sub>Cl) – P extraído por solução de cloreto de amônio 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> (GATIBONI et al., 2000) e determinado pelo método de Murphy e Riley (1962); Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) extraídos por KCl 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> e determinados em absorção atômica (EMBRAPA, 2009); H+Al – hidrogênio + alumínio extraído por acetato de Cálcio 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> e determinado por titulometria com NaOH (0,0025 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>) (EMBRAPA, 2009) e matéria orgânica do solo (MOS) extraído pela oxidação com dicromato de potássio e determinado por colorimetria (RAIJ et al., 2001).

<sup>2</sup>Classificação dos teores de P disponível (Mehlich I) para plantios de sequeiro no cerrado em solo com 55% de Argila (SOUSA e LOBATO, 2004).

<sup>3</sup>Fosfato Reativo (FR), Monoamônio Fosfato (MAP), Superfosfato Simples (SS) e Superfosfato Triplo (ST).

A colheita da soja foi realizada manualmente, coletando aleatoriamente quatro plantas dentro da área útil de cada parcela (COUTO, 20018; TRINDADE, 2016). Após a colheita realizou a aferição da altura da planta (m) e os grãos foram debulhados de forma manual e secos em estufa de circulação forçada de ar a 65-70°C até peso constante, objetivando atingir uma umidade de 13%. Em seguida, foi determinado o peso de mil grãos (g) e estimada a produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>) com base na população de plantas e com correção da umidade dos grãos para 13%. Os grãos foram triturados em moinho tipo Willey e destinados a análise química de tecido para determinação dos teores de P (MALAVOLTA et al., 1997). Multiplicando os valores dos teores de P nos grãos pela produtividade de grãos, estimou a exportação de P, em equivalente molar de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, por

unidade de área ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Para a estimativa da exportação foram utilizados os dados de produtividade de grãos ( $\text{kg ha}^{-1}$  de grãos) sem umidade.

Com base nos dados de produção foram estimados os valores da eficiência agrônômica das fontes (Ef) que equivale ao incremento percentual de produtividade de grãos em relação ao tratamento controle (Equação 1) e eficiência do uso (EU), que equivale ao incremento de produtividade em relação ao tratamento Controle em quilograma por unidade de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicada em quilograma ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) (Equação 2) (NOVAIS e SMYTH, 1999).

$$Ef(\%) = \{(P.Tratamento - P.Controle)/P.Controle\} \times 100 \dots\dots\dots \text{.....Equação 1}$$

$$EU (\text{kg kg}^{-1}) = \{(P.Tratamento - P.Controle)/D.P_2O_5\} \dots\dots\dots \text{.....Equação 2}$$

Em que:

*P.Tratamento* – produtividade de grãos do tratamento ( $\text{kg ha}^{-1}$ );

*P.Controle* – produtividade de grãos do controle sem adubação fosfatada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e

*D.P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>* – dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$  utilizada em  $\text{kg ha}^{-1}$ .

Após a colheita da soja, coletou-se os resíduos culturais e para isto foi utilizado um molde construído com um tubo PVC de 0,2 m de diâmetro, delimitando uma área de 0,0314  $\text{m}^2$ . O molde foi lançado aleatoriamente na parcela útil, por três vezes em cada parcela, e coletado os resíduos na área de cada molde. Os resíduos culturais recolhidos foram lavados até a retirada total de partículas do solo. Em seguida, foram acondicionadas em sacos de papel tipo kraft, previamente identificados, e secos em estufa de circulação forçada de ar a 65-70°C. Após a secagem, pesou-se as amostras para estimar a quantidade de resíduos culturais por unidade de área ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), posteriormente foram moídas para análise do teor de P ( $\text{g kg}^{-1}$ ). A extração foi a seco em mufla a 500°C e a determinação realizada através do desenvolvimento da cor azul (MALAVOLTA et al., 1997). Com base nos dados de resíduos culturais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e dos teores de P ( $\text{g kg}^{-1}$ ) foi estimado o total de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nos resíduos culturais ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Ao final de cada safra, coletou-se o solo na camada de 0,0 – 0,10 m. A amostra simples da referida camada avaliada foi composta por uma faixa de solo compreendida entre a linha e a entre linha de plantio (CANTARUTTI et al., 2007). Foram realizadas três amostragens simples por parcela, que foram misturadas para a retirada de uma amostra composta representativa de cada parcela. As amostras foram secadas ao ar e peneiradas em tamis com malha de 2 mm, e acondicionadas em sacos plásticos previamente identificados. A amostragem do solo foi realizada somente na camada de 0 a 0,10 m, em função da influência dos fertilizantes aplicados na linha nas camadas de 0,05 a 0,07 m (COUTO, 2018). Posteriormente as amostras foram destinadas a extração de fósforo pelo método Mehlich I e determinadas através do desenvolvimento da cor azul (EMBRAPA, 2009) e com extrator  $\text{NH}_4\text{Cl}$  a  $1 \text{ mol}_e \text{ L}^{-1}$  (CHEN et al., 2000) e determinado pelo método de MURPHY e RILEY (1962). O uso do extrator  $\text{NH}_4\text{Cl}$  para análise química de P disponível no solo é uma alternativa ao uso do método da Resina (GATIBONI et al., 2013), com a vantagem de ser mais rápido o processo e com geração de menos resíduos químicos após a análise. Outra vantagem do uso do extrator  $\text{NH}_4\text{Cl}$  para extração de P no solo é a não superestimação dos valores em área com a aplicação de Fosfatos Naturais.

Com base nos dados de exportação de P (E) ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), quantidade de P nos resíduos culturais (RC) ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) após a colheita e a dose de P aplicada antes do plantio (D) ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), foi realizado o balanço de P no sistema produtivo após as safras 2016/2017 (Equação 3) e 2017/2018 (Equação 4) em  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

$$B_{2016/2017}(\text{kg ha}^{-1}) = (D + RC - E) \quad \dots\dots\dots\text{Equação}$$

**3**

$$B_{2017/2018}(\text{kg ha}^{-1}) = (B_{2016/2017} + D + RC - E) \quad \dots\dots\dots\text{Equação}$$

**4**

Em que: ,

$B_{2016/2017}$  = balanço de P após a safra 2016/2017 ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ );

$B_{2017/2018}$  = balanço de P após a safra 2017/2018 ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ );

D = dose de P aplicado ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ );

RC = quantidade de P nos resíduos culturais após colheita as safras ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ );

$E = P$  exportado na colheita ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância e teste de agrupamento de médias média (Scott Knott a 5% de probabilidade) para os tratamentos dentro do fatorial e por contrastes ortogonais (Teste de F a 1 e 5% de probabilidade) entre os tratamentos do fatorial e Controle.

Para a análise estatística de eficiência das fontes (Ef) e de eficiência de uso das fontes (EU) foi realizado somente a ANOVA do fatorial, pois esses índices foram estimados com base no tratamento controle (Equações 1 e 2). Assim, foi utilizado o delineamento experimental em blocos ao acaso em esquema fatorial 4 x 2, sendo 4 fontes (FR, MAP, SS e ST) e duas formas de aplicação (a lanço e na linha).

As análises estatísticas foram realizadas no programa R 4.0.1 para Windows (R CORE TEAM, 2020) e com os pacotes ExpDes.pt 1.2.0 (FERREIRA et al., 2018), gplots 3.0.3 (WARNES et al., 2020) e gmodels 2.18.1 (WARNES et al., 2018).

### 3. RESULTADOS

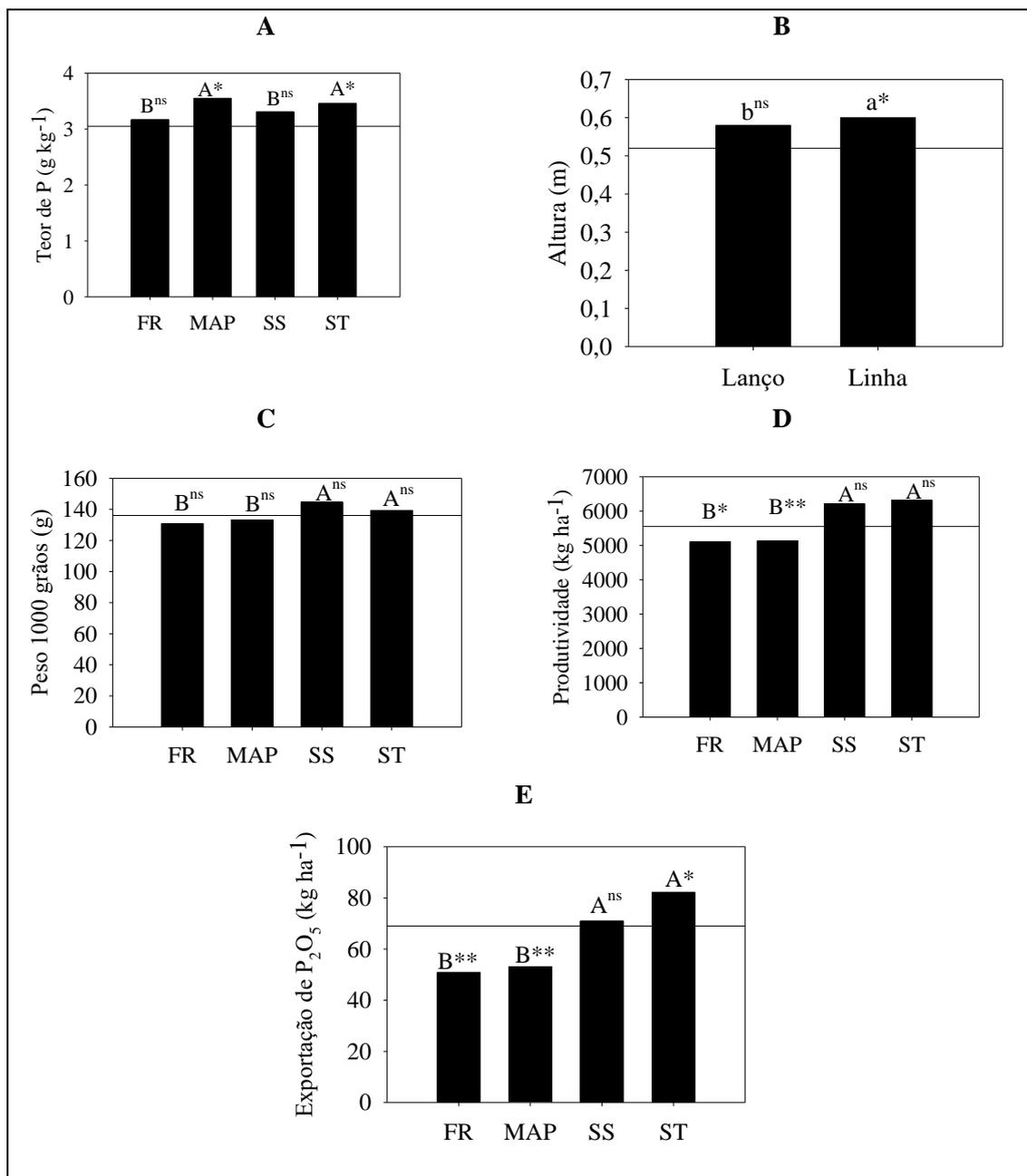
Na safra 2016/2017 os teores foliares de fósforo (P) na cultura da soja variaram de 3 a 3,8 g kg<sup>-1</sup>. Essa variação se encontra dentro da faixa de adequada para a cultura da soja (KURIHARA et al., 2013). Mesmo dentro da faixa de suficiência, as plantas da soja que receberam adubação com o Monoamônio Fosfato (MAP) e Superfosfato Triplo (ST) obtiveram os maiores teores de P foliar em relação às áreas que receberam a adubação com o Fosfato Reativo (FR), Superfosfato Simples (SS) e sem adubação fosfatada (Controle) (Figura 2 A).

As plantas adubadas com os fertilizantes fosfatados aplicados na linha obtiveram incremento significativo de 0,08 m na altura das plantas, em relação ao controle, e de 0,02 m, em relação às plantas adubadas com fontes de P a lanço (Figura 2 B). A altura das plantas que receberam a adubação a lanço não diferiu do controle (Figura 2 B).

O peso de mil grãos variou somente em função das fontes de P (Figura 2 C). A aplicação do SS e ST apresentaram os maiores valores para o peso de mil grãos, independente da forma de aplicação (Figura 2 C).

A produtividade de grãos da soja variou somente em função das fontes (Figura 2 D). As maiores produtividades foram obtidas com a aplicação do SS (6215,8kg ha<sup>-1</sup>) e do ST (6315,6kg ha<sup>-1</sup>), as quais não diferiram das áreas sem adubação fosfatada (5552, 0 kg ha<sup>-1</sup>) (Figura 2 D). A aplicação de SS e ST resultaram num incremento de 12 e 13,8% respectivamente, na produtividade da soja quando comparada ao controle (ausência de adubação fosfatada).

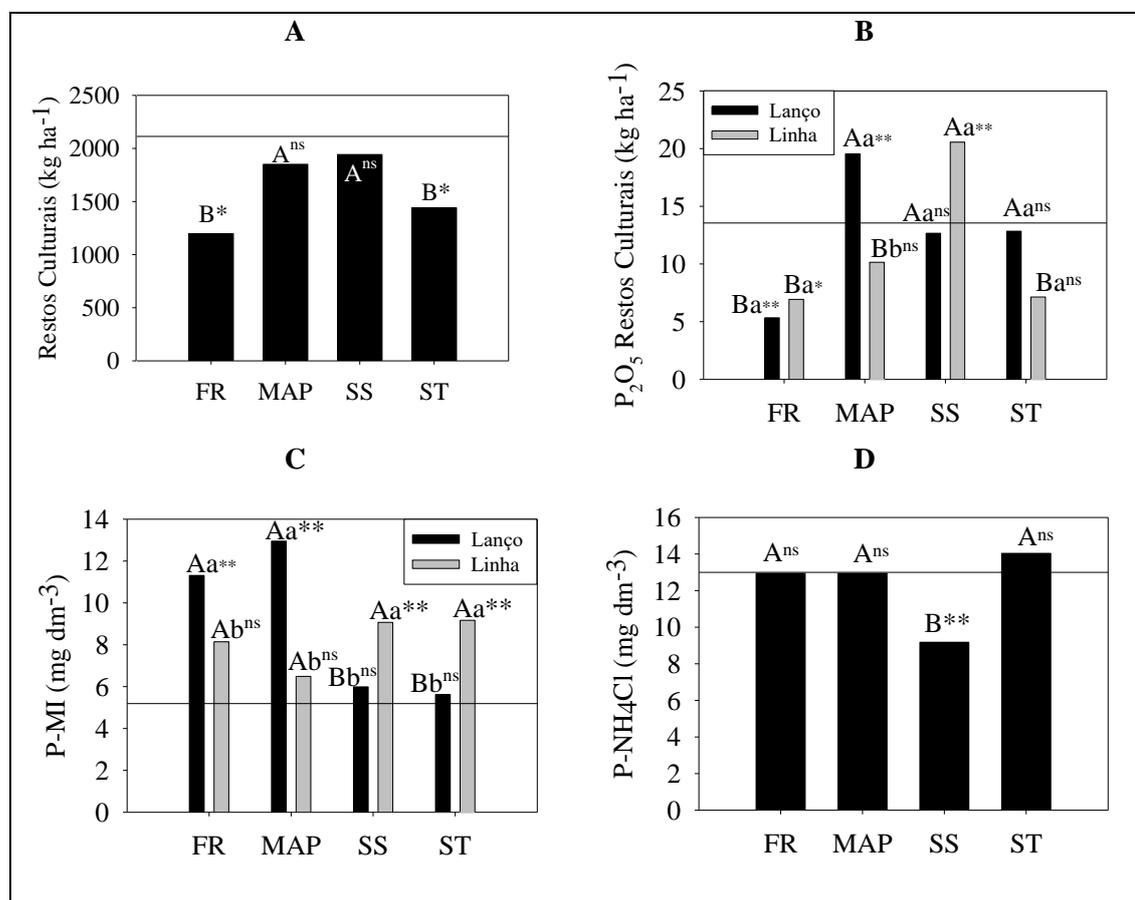
A exportação do P em kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por unidade de área (kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) foi significativamente maior quando aplicado o SS e o ST (Figura 2 E). Todavia, dentre esses fertilizantes, somente os valores de exportação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pelas plantas adubadas com o ST diferiu do tratamento controle (Figura 2 E), com acréscimo de 13 kg ha<sup>-1</sup> de P, ou seja, um incremento de 18,8% na exportação de P por unidade de área. Quando a soja foi adubada com o FR e o MAP, independente da forma de aplicação, observaram as menores produtividade de grãos (Figura 2 D), e conseqüentemente, os menores valores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> exportado por unidade de área, e significativamente inferiores à exportação sem adubação fosfatada (Figura 2 E).



**Figura 2.** Teores de P foliar (g kg<sup>-1</sup>) em R1 (A), Altura (m) (B), Peso de mil grãos (g) (C), Produtividade da soja (kg ha<sup>-1</sup>) (D) e Exportação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pela soja safra 2016/2017 em kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (E), em função das fontes (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes. As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C, D, E e F, correspondem aos valores obtidos pelo tratamento controle. Letras maiúsculas distinguem as fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação, ou independente da forma de aplicação; e as letras minúsculas distinguem as formas de aplicação entre si, dentro de cada fonte, ou independente da fonte. \*\*, \* e <sup>ns</sup>Variação significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

Os restos culturais avaliados após a safra 2016/2017 compreendem os resíduos da colheita mais os resíduos de palhadas de safras anteriores. Os maiores valores dos restos culturais, dentre as fontes de P, foram obtidos nas áreas com aplicação do MAP e do SS (Figura 3 A). Os tratamentos com aplicação de MAP a lanço e SS na linha também

apresentaram maiores teores de  $P_2O_5$  nos restos culturais avaliados, diferindo do controle (Figura 3 B). E nas áreas com a aplicação do FR a lanço e na linha, foram obtidos os menores valores de  $P_2O_5$  nos restos culturais em relação as demais fontes de fósforo e ao tratamento Controle (Figura 3 B).



**Figura 3.** Restos Culturais ( $kg\ ha^{-1}$ ) (A), Teor de  $P_2O_5$  nos restos culturais ( $kg\ ha^{-1}$ ) (B), P residual disponível pelo extrator Mehlich I ( $mg\ dm^{-3}$ ) (P-MI) (C), P residual disponível pelo extrator (P- $NH_4Cl$ ) ( $mg\ dm^{-3}$ ) (D) após a colheita da soja da safra 2016/2017 em função das fontes de P (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes. As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C e D correspondem aos valores obtidos pelo tratamento controle. Letras maiúsculas distinguem as Fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação, ou independente da forma de aplicação; e as letras minúsculas distinguem as formas de aplicação entre si, dentro de cada fonte, ou independente da fonte. \*\*, \* e <sup>ns</sup>Variação significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% e não significativa, respectivamente.

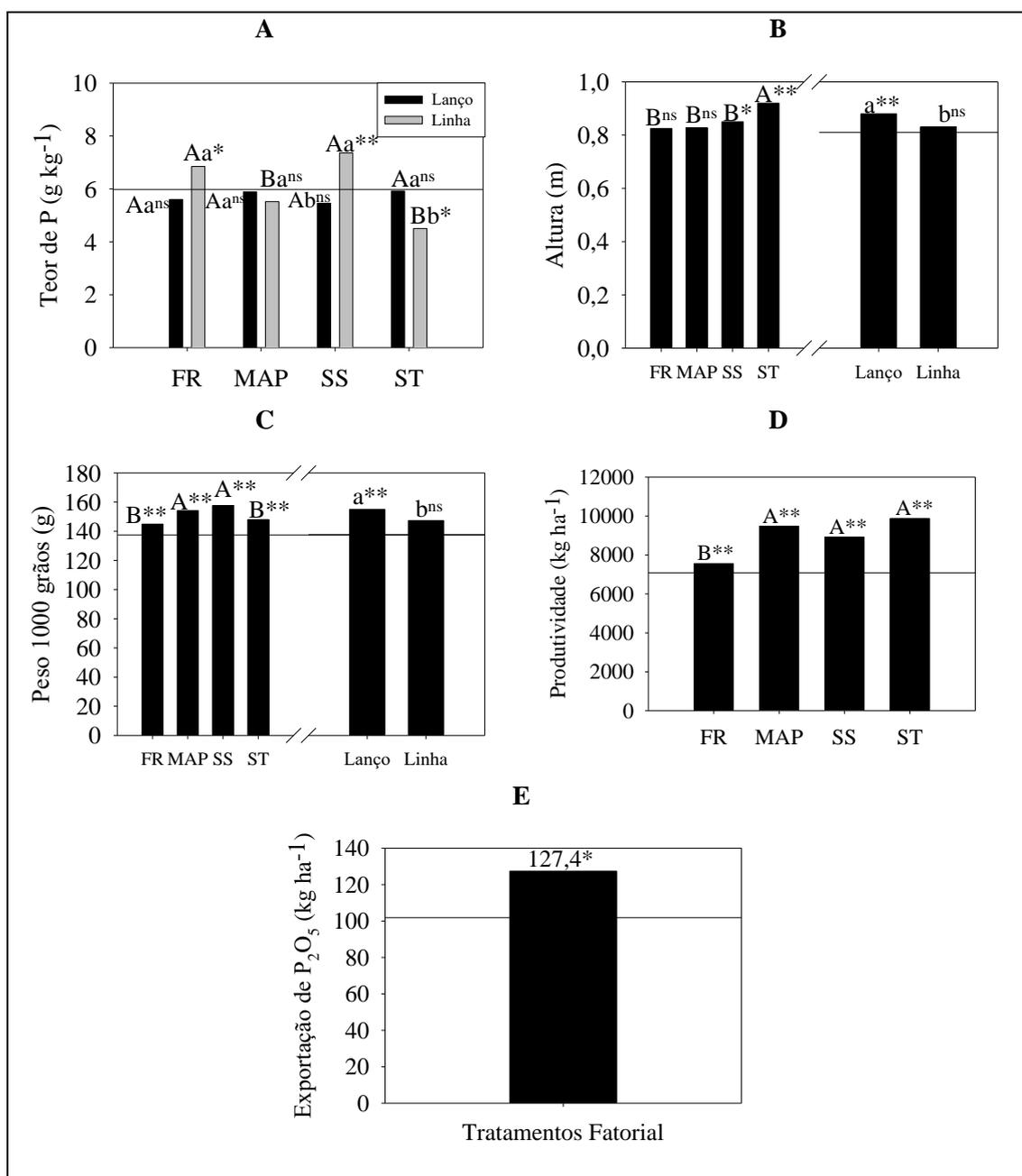
O P disponível avaliado pelo extrator MI após a safra 2016/2017, representou o P residual (Figura 3 C). Os maiores valores de P-MI residual foram obtidos com a aplicação do FR e MAP a lanço e o SS e ST na linha (Figura 3 C), diferindo das áreas sem adubação fosfatada (Figura 3 C).

Quando avaliado o P residual após a safra 2016/2017 utilizando o extrator  $NH_4Cl$ , os valores variaram somente em função das fontes, com o menor valor obtido nas áreas

com a aplicação do SS, e que foi inferior as áreas sem adubação fosfatada (Figura 3 D). Com o uso do  $\text{NH}_4\text{Cl}$  como extrator, observa-se que o P residual nas áreas com aplicação do FR, MAP e ST, foram semelhantes aos controles (Figura 3 D).

Na safra 2017/2018 os teores foliares de P na cultura da soja variaram de 4,5 a 7,4  $\text{g kg}^{-1}$  de P, valores esses, superiores à faixa de suficiência para a cultura da soja sob cerrado (KURIHARA et al., 2013). Os fertilizantes fosfatados aplicados a lanço não diferiram entre si e nem quando comparados ao controle (Figura 4 A). A aplicação na linha dos fertilizantes FR e SS proporcionaram maiores teores de P no estágio R1 quando comparados com as demais fontes aplicadas na linha e com o controle (Figura 4 A). Observa-se ainda que as fontes SS aplicada na linha e ST aplicada a lanço apresentaram teores maiores de P foliar em comparação a aplicação de SS e ST aplicados a lanço e na linha, respectivamente (Figura 4 A).

A adubação com ST independente da forma de aplicação obteve a maior altura das plantas de soja em comparação as outras fontes e ao tratamento Controle (Figura 4 B). Para essa mesma variável a aplicação a lanço, independente das fontes, mostrou-se superior à aplicação a linha (Figura 4 B) com incremento de 0,05 m na altura das plantas de soja. Plantas de maior porte podem representar aumentos no número de internódios, que conseqüentemente resultará no incremento no número de vagens. O incremento no número de vagens mais o peso grãos resulta no aumento de produtividade. O peso de mil grãos variou em função da fonte de P e da forma de aplicação, contudo, não houve interação significativa entre esses fatores. A adubação fosfatada, independentemente da fonte utilizada, proporcionou maior peso de mil grãos e maior produtividade em relação ao Controle (Figuras 4 C e D, respectivamente). As fontes que proporcionaram maior incremento no peso de mil grãos foram o MAP e o SS (Figura 4 C). A aplicação a lanço de todas as fontes proporcionou maior peso de mil grãos quando comparadas à aplicação na linha, e também ao tratamento sem adubação (Figura 4 C), apresentando um incremento de 7,7 g.



**Figura 4.** Teores de P foliar (g kg<sup>-1</sup>) em R1 (A), Altura (m) (B), Peso de mil grãos (g) (C), Produtividade da soja (kg ha<sup>-1</sup>) (D) e Exportação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pela soja safra 2017/2018 em kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (E) e em kg Mg<sup>-1</sup> de P (F), em função das fontes (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes. As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C, D, E e F, correspondem aos valores obtidos pelo tratamento controle. Letras maiúsculas distinguem as fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação, ou independente da forma de aplicação; e as letras minúsculas distinguem as formas de aplicação entre si, dentro de cada fonte, ou independente da fonte. \*\*, \* e <sup>ns</sup>Varição significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

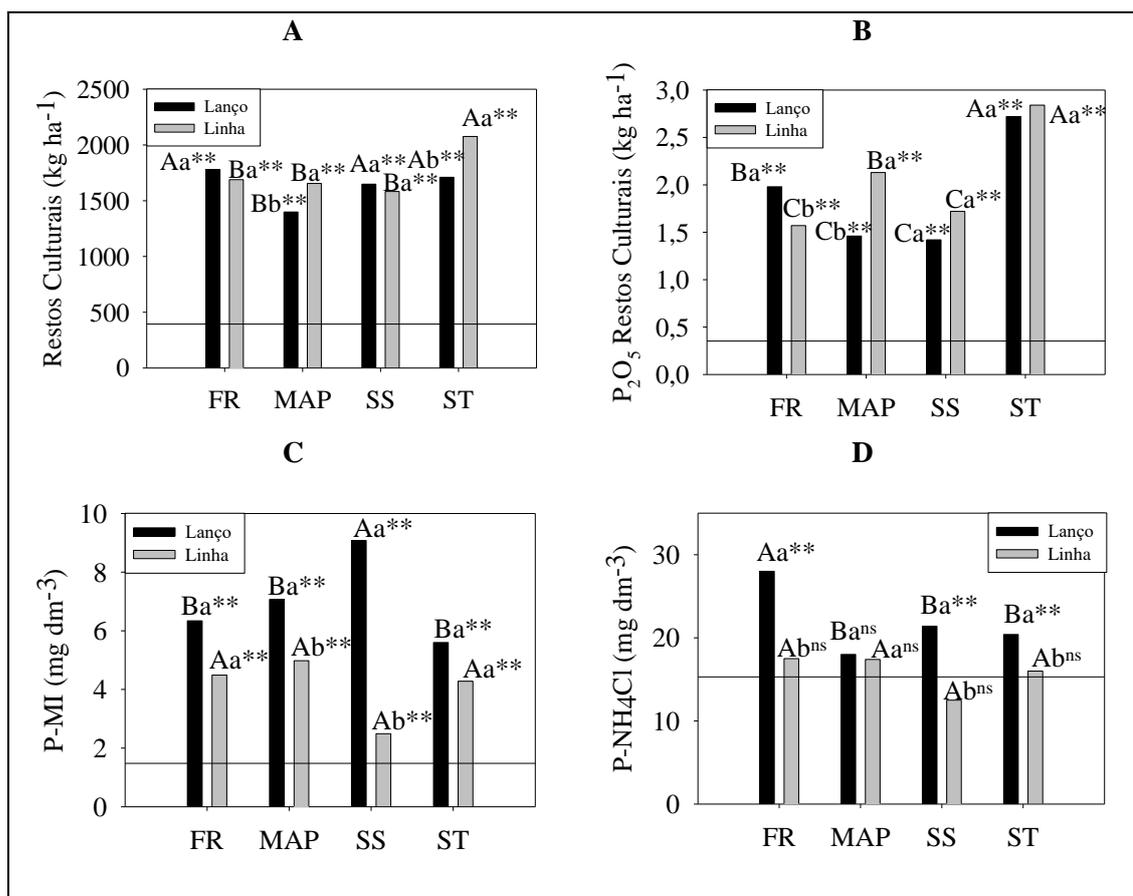
Assim, como na safra 2016/2017, a produtividade da safra 2017/2018 foi influenciada apenas pelas fontes de P e estas foram superiores ao Controle. Sendo que, a aplicação de MAP, SS e ST apresentaram as maiores produtividade (Figura 4 D). A produtividade média destas fontes foi de 9426,04 kg ha<sup>-1</sup>, já o FR e o Controle

apresentaram as menores produtividades e foram respectivamente 7559,45 e 7087,36 kg ha<sup>-1</sup>. Assim, com a aplicação do MAP, SS e ST nas condições edafoclimáticas da safra 2017/2018, houve incremento de 33% na produtividade de grãos da soja em relação ao Controle.

Para a exportação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por unidade de área (kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) não houve significância estatística ( $p > 0,05$ ) para os fatores fontes e formas de aplicação, nem para a interação entre esses. Ocorreu variação significativa apenas para a interação entre o fatorial e o adicional (Controle) (Figura 4 E). Os tratamentos do fatorial apresentaram a taxa de exportação de 127,4 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, enquanto o tratamento controle esse valor foi de 101,2 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

As maiores quantidades de restos culturais e de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> residual presente nos restos culturais foram obtidos com a aplicação do ST na linha e ST a lanço e linha, respectivamente (Figuras 5 A e B). O ST na safra 2017/2018, além de proporcionar maior produtividade de grãos (Figura 4 D), também foi eficiente em transformar o P inorgânico em P orgânico nos restos culturais. E esse efeito é desejável, pois reduz as perdas do P inorgânico aplicado via fertilizante, e que será disponibilizado na fração P-orgânico do solo para cultivos futuros.

Os tratamentos com adubação fosfatada, a lanço e na linha, apresentaram maior teor de P disponível residual (P-MI) em relação ao Controle após a safra 2017/2018 (Figura 5 C). O maior teor de P-MI foi obtido com a aplicação de SS a lanço com teor médio de 9,08 mg dm<sup>-3</sup> e a aplicação de SS na linha resultou num menor teor de P residual no solo (2,49mg dm<sup>-3</sup>) na camada de 0,0 a 0,10 m (Figura 5 C). Quando avaliado o P residual utilizando o extrator NH<sub>4</sub>Cl, o FR a lanço apresentou maior teor de P (28,00 mg dm<sup>-3</sup>) seguido do SS a lanço (21,40 mg dm<sup>-3</sup>) (Figura 5 D). Nesta mesma Figura, observou-se que o SS aplicado na linha apresentou o menor teor de P residual com valor de 12,50 mg dm<sup>-3</sup>.



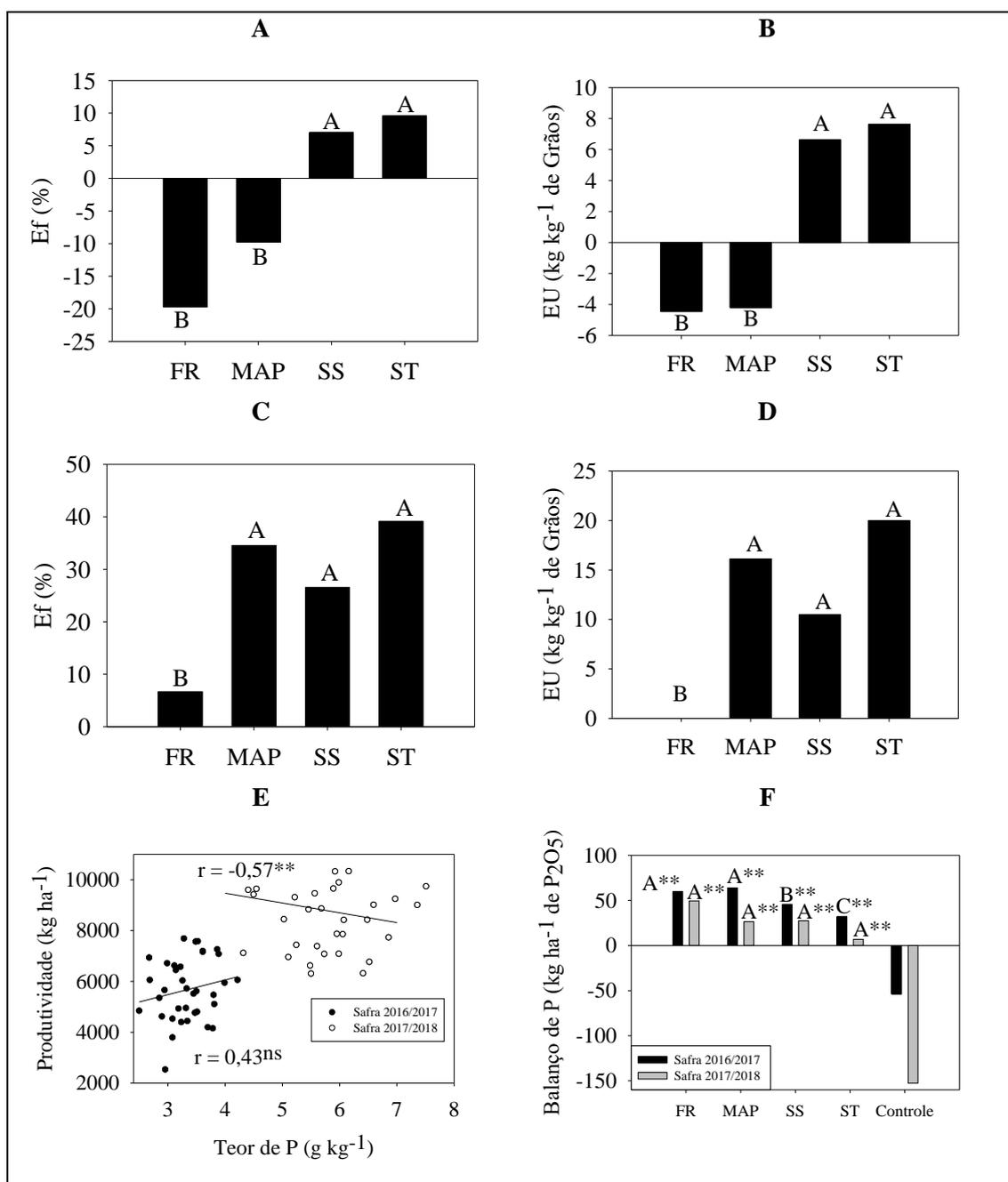
**Figura 5.** Restos Culturais (kg ha<sup>-1</sup>) (A), Teor de fósforo (P) nos restos culturais (kg ha<sup>-1</sup>) (B), P residual disponível pelo extrator Mehlich I (mg dm<sup>-3</sup>) (P-MI) (C), P residual disponível pelo extrator (P-NH<sub>4</sub>Cl) (mg dm<sup>-3</sup>) (D) após a colheita da soja da safra 2016/2017 em função das fontes de P (Fosfato Reativo – FR; Monoamônio Fosfato – MAP; Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (Lanço e Linha) dos fertilizantes e correlação entre a produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>) e os teores de P disponível no solo antes do plantio da safra 2017/2018 obtidos pelos extratores Mehlich I (P-MI) e NH<sub>4</sub>Cl (P-NH<sub>4</sub>Cl) (E). As linhas contínuas paralelas ao eixo “x” dos gráficos A, B, C e D correspondem aos valores obtidos pelo tratamento Controle. Letras maiúsculas distinguem as Fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação, ou independente da forma de aplicação; e as letras minúsculas distinguem as formas de aplicação entre si, dentro de cada fonte, ou independente da fonte. <sup>\*\*</sup>, <sup>\*</sup> e <sup>ns</sup>Variação significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% e não significativa, respectivamente.

## 4. DISCUSSÃO

### Formas de Aplicação

Nas safras 2016/2017 (Figura 2 D) e 2017/2018 (Figura 4 D) as formas de aplicação não influenciaram a produtividade de grãos da soja, e conseqüentemente não influenciaram na eficiência das fontes (Ef) e no uso (EU) do P aplicado (Figuras 6 A, B, C e D). Em áreas com efeitos residuais de P acumulados de cultivos anteriores (SOUSA e LOBATO, 2004) ou quando os teores de P disponível estão acima do nível crítico (ANGHINONI, 1992; PAVINATO e CERETTA, 2004; NUNES et al., 2011) e, ou, quando os teores de P disponível estão em níveis adequados e superiores nas tabelas de interpretação do P disponível no solo (BARBOSA et al., 2015; SOUSA et al., 2016) a forma de aplicação das fontes de P não altera o rendimento das culturas. Segundo Pottker (1999), a aplicação localizada de P é mais satisfatória, quando os teores disponíveis no solo estão abaixo do nível crítico, como em áreas de abertura de cerrado (NOVAIS e SMYTH, 1999).

Todavia, antes das duas safras deste trabalho, os teores de P disponível (Mehlich I) foram classificados entre baixo a alto para a safra 2016/2017 e de médio a alto para a safra 2017/2018 (Tabela 2). E mesmo assim, não houve diferença das formas de aplicação dos fertilizantes fosfatados na produtividade (Figuras 2 D e 4 D) e eficiências das fontes (Figuras 6 A, B, C e D). Para a interpretação dos teores de P disponível no solo na região do cerrado, extraídos pelo método Mehlich I e Resina, utiliza-se a textura do solo como fator tampão de P (RIBEIRO et al., 1999; SOUSA e LOBATO, 2004). Ou seja, quanto mais argiloso o solo, maior a quantidade de P a ser aplicada para atender a demanda da planta, em função dos solos tropicais serem muito intemperizados eles tornam-se alto dreno de P, e este fato ocorre devido à adsorção do P na superfície dos coloides e, ou, mesmo pela precipitação do P na solução do solo quando em contato com o Fe e Al elementos estes presentes em solos ácidos como no presente estudo, e também devido à precipitação do P quando combinado com o Ca em solos corrigidos (NOVAIS e SMYTH, 1999).



**Figura 6.** Eficiência agrônômica (%) e de uso das diferentes fontes de fósforo na cultura da soja nas safras 2016/2017 (A e B, respectivamente) e 2017/2018 (C e D, respectivamente); correlação entre os teores foliares e a produtividade de grãos da soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018 (E) e balanço de P nas safras 2016/2017 e 2017/2018 (F). \*\*, \* e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente, pelo teste de F (5% de prob.) para a Figura A. Letras maiúsculas distinguem as Fontes entre si, pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade para as figuras, C, D e E.

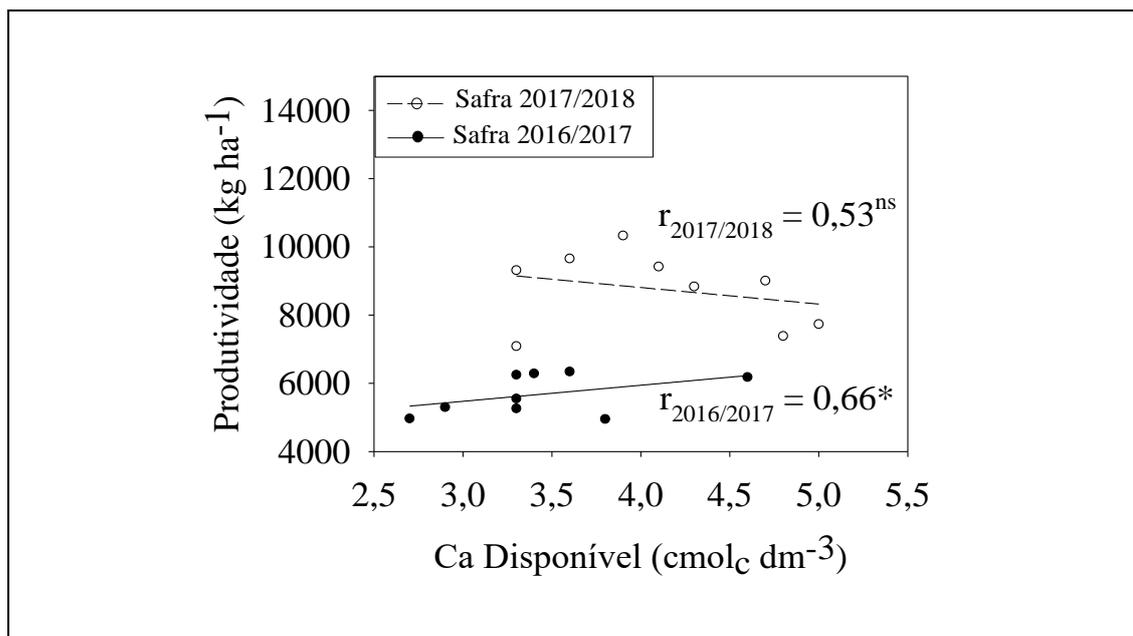
O solo do presente estudo possui perfil superficial nitossólico 0,18 a 0,6 m de camada (Tabela 1) e com teores de matéria orgânica (Tabela 2) classificados como bom (RIBEIRO et al., 1999). Logo, os elevados teores de matéria orgânica presentes neste solo, culminou em altos teores de P na fração orgânica do solo, cujos valores variaram de 200 a 400 mg dm<sup>-3</sup> de P (COUTO 2018), e este fato pode ter tamponado o P inorgânico

prontamente disponível (GATIBONI et al., 2013, MARANGUIT et al., 2017). Sendo assim, é possível obter altas produtividades, independente da forma de aplicação dos fertilizantes fosfatados, em solos com níveis de P disponíveis abaixo do adequado.

### **Fontes de fósforo**

As maiores produtividades foram obtidas com a aplicação do SS e ST na safra 2016/2017 (Figura 2 D), e com a aplicação do MAP, SS e ST na safra 2017/2018 (Figura 4 D). Esses resultados evidenciam a diferença obtida com o MAP nas duas safras em que, na safra 2016/2017 obteve eficiência inferior ao controle (Figuras 6 A e B) e na safra 2017/2018 apresentou eficiência semelhante ao SS e ST (Figuras 6 C e D). Na literatura há relatos de que a aplicação de fonte de N amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) acompanhado de ânion fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) aumenta a eficiência do fertilizante fosfatado (NOVAIS e SMYTH, 1999; ANTUNOVIĆ et al., 2012). Nas safras 2014/2015 o MAP, independente da forma de aplicação e na safra 2015/2016 o SS e ST a lanço obtiveram as maiores produtividade de grãos da soja (COUTO, 2018). Ou seja, nas safras 2014/2015 e 2017/2018 o MAP destacou-se entre as melhores fontes.

Tanto o MAP, quanto o SS e o ST, são fontes de P solúveis. A principal diferença entre essas fontes é que no MAP o P está associado ao  $\text{NH}_4^+$  e no SS e ST está associado ao Ca (MALAVOLTA, 1981). Na Figura 7, observa-se que há correlação positiva entre a produtividade da soja na safra 2016/2017 com os teores de Ca disponível no solo antes do plantio (Tabela 2). Esse resultado pode explicar a maior eficiência das fontes de P solúveis associadas ao Ca (SS e ST) na safra 2016/2017.



**Figura 7.** Correlação entre os teores de Ca disponível antes do plantio com a produtividade de grãos da soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018. \*\*, \* e <sup>ns</sup>Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente, pelo teste de F (5% de probabilidade).

A maior produtividade de grãos com a aplicação de fontes de P associado ao Ca (SS e ST) também pode ser atribuído ao efeito do Ca que promoveu maior crescimento do sistema radicular das plantas, em específico da soja, em condições de estresse hídrico e baixa concentração de Ca citosólico nas raízes, ocorrerá redução do crescimento das plantas, e o teor de proteínas no citosol altera o metabolismo do carbono (WANG e KOMATSU, 2017). Então, com o maior crescimento do sistema radicular da soja, há maior possibilidade de manter o potencial produtivo da cultura sob condições de estresse hídrico (FRANCHINI et al., 2009). Na safra 2016/2017 durante o estágio vegetativo da cultura, aproximadamente até 30 dias após a semeadura, houve precipitação acumulada de 129 mm. A baixa disponibilidade hídrica nos estádios de desenvolvimento vegetativo da soja pode reduzir em mais de 40% a produtividade de grãos (FARIAS et al., 2007).

Já, na safra 2017/2018, não houve correlação entre o Ca disponível antes da semeadura (Tabela 2) e a produtividade de grãos da soja (Figura 7). Nessa safra a precipitação durante a fase vegetativa da soja, aproximadamente 30 dias após a semeadura, foi de 221 mm, comparado com a safra 2016/2017 tem-se aumento de 92 mm de precipitação. O aumento da disponibilidade hídrica no solo, favorece os processos de solubilização dos fertilizantes através das reações na interface solo: solução, fato este que contribui para o aumento de nutrientes no complexo sortivo do solo e também favoreceu maior crescimento do sistema radicular das plantas aumentando a taxa de absorção desses

nutrientes, e estes fatos ocasionaram efeitos positivos no desenvolvimento da soja e nos parâmetros produtivos. Assim, com a maior disponibilidade hídrica, houve alta resposta em produtividade com a aplicação do MAP na safra 2017/2018, junto ao SS e ST. Nesse sentido, existe baixa influência do Ca disponível residual das safras anteriores, pela maior disponibilidade hídrica.

Assim, a variação das respostas das fontes solúveis pode estar associada à disponibilidade hídrica durante a fase de maior absorção de P pelas plantas que é no estágio vegetativo. Evidenciando o melhor desempenho das fontes SS e ST em ambas as safras, e principalmente sob menor disponibilidade hídrica no estágio vegetativo (safra 2016/2017) e do MAP na segunda safra. Sabe-se que as plantas necessitam de fornecimento de P na fase inicial de desenvolvimento para garantir bom rendimento a cultura, e que a falta deste nutriente nessa fase causa mais impacto do que outros estádios ao longo do ciclo (GRANT et al., 2001).

Santos (2016), em estudo com diferentes fontes de fósforo na cultura da soja observou incremento de 95,6% na produtividade com aplicação de SS em comparação ao tratamento controle. Chien et al. (2016) relataram em sua revisão que, fontes de fertilizantes fosfatados com S em sua composição contribui para o desenvolvimento da cultura proporcionando máximo rendimento desta. Resultados expressivos foram encontrados por outros autores com a aplicação de ST na cultura da soja (NETO et al., 2010; BREVILIERI, 2012).

### **Outras Discussões**

As produtividades da soja nas safras avaliadas foram altas com as diferentes fontes de P e formas de aplicação, e até mesmo no tratamento controle, podendo ser justificado pelo tamponamento do P disponível por frações orgânicas. Em ambas as safras não foram observados sintomas de deficiência de P nos tratamentos sem adubação fosfatada (Controle).

Conforme a tabela de nível crítico para a interpretação do estado nutricional da soja no cerrado brasileiro (KURIHARA et al., 2013) o intervalo dos teores de P entre 2,8 a 3,3 g kg<sup>-1</sup> é classificado com suficiente e 3,4 a 3,9 g kg<sup>-1</sup> é classificado como alto e acima de 4,0 g kg<sup>-1</sup> é classificado como excesso. Assim, a variação dos teores foliares de P encontrados na safra 2016/2017 (3 a 3,8 g kg<sup>-1</sup>), são classificados como suficientes a alto. A variação dos teores foliares de P obtidos na safra 2017/2018 (4,5 a 7,4 g kg<sup>-1</sup> de P) são classificados como excesso.

Outra forma de avaliar o estado nutricional das plantas é através da correlação entre a produtividade de grãos e os teores foliares (Figura 6 E). Todavia, essa correlação apresenta ajuste de um modelo de uma curva em “C” (MALAVOLTA, 2006; RÖMHELD, 2012). Esse ajuste não linear é atribuído aos efeitos de concentração e de diluição dos nutrientes no tecido das plantas (JARREL e BEVERLY, 1981). Quando se faz correlação entre os teores foliares e a produtividade das plantas, como apresentado na Figura 6 E, o que se obtêm, na maioria dos estudos, e no caso específico da soja e P (STAMMER e MALLARINO, 2018; ANTONANGELO et al., 2019), é uma fração da curva em “C”.

Na safra 2016/2017 não houve significância da correlação entre a produtividade de grãos e teores de P na safra 2016/2017, ou seja, um ajuste quase paralelo ao eixo “x” do gráfico (Figura 6 E). Assim, pode-se afirmar que essa variação está dentro da faixa classificada como adequada da curva em “C”, mesmo porque não foram observados sintomas visuais de deficiência de P nas plantas. Esse resultado corrobora com o obtido para a cultura da soja cultivada no município de Londrina, Estado do Paraná, Brasil, sob bioma de floresta subtropical de araucárias, no qual em lavouras de soja com teores foliares de P acima de  $3,9 \text{ g kg}^{-1}$ , não há incremento de produtividade de grãos (ANTONANGELO et al., 2019).

Na safra 2017/2018 a variação dos teores foliares de P no estágio R1 e a produtividade de grãos apresentou correlação linear inversa significativa, com coeficiente de correlação de  $-0,57$ , indicando que quanto maior os teores foliares de P menor a produtividade de grãos da soja (Figura 6 E). Assim, o modelo ajustado para a correlação entre a produtividade de grãos e os teores foliares de P na safra 2017/2018, equivale à faixa de toxidez do modelo de interpretação da curva em “C”.

E finalmente, devido as menores produtividades (Figura 2 D) e exportação de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nas áreas com a aplicação do FR e MAP, na safra 2016/2017 (Figuras 2 E e F), há maior balanço de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , conforme estimado pela Equação 3 (Figura 6 F). Já com a aplicação do SS e do ST, o balanço de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Equação 3) foi menor, pelas altas produtividades de grãos com esses fertilizantes (Figura 2 D), o que resultou em alta eficiências (Figuras 6 A e B).

Já na área sem adubação fosfatada na safra 2016/2017, que é o terceiro ano consecutivo sem adubação, o balanço de  $\text{P}_2\text{O}_5$  foi negativo (Figura 6 F). Todavia, esse resultado se contradiz com a alta produtividade de grãos obtida na área sem adubação fosfatada, assemelhando-se às áreas com a aplicação do SS e ST (Figura 2 D). A alta

produtividade e exportação de P na área a três safras consecutivas sem adubação fosfatada pode ser explicado pelos altos teores de P na matéria orgânica (COUTO, 2018) que tamponam o P disponível no solo. Assim, pode afirmar que em áreas com altos teores de P na fração orgânica do solo, há tamponamento do P em solução. Ou mesmo, justificar a eficiência de fertilizantes orgânicos serem fontes de P eficientes quando comparado a fontes minerais como o MAP (MUMBACH et al., 2020). A adição de matéria orgânica no solo, contribui para a diminuição da adsorção e consequente aumento da disponibilidade de fósforo nas plantas (BEZERRA et al., 2015).

Na safra 2017/2018 o balanço de P não diferiu entre as fontes, mas esses tratamentos diferiram do controle. Chama a atenção o déficit de  $-152 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  no tratamento Controle na safra 2017/2018. Esse resultado pode ser explicado pelos altos teores de P na fração orgânica desse solo (COUTO, 2018 e Capítulo 2, Figuras 5 F, G e H). Como há mudança do paradigma do uso de P em solos sob cerrado no Brasil, em função de altas doses aplicadas no passado (WITHERS et al., 2018) e a redução do tempo de vida útil das minas de exploração da matéria-prima utilizada na produção de fertilizantes fosfatados acidulados, com destaque para os dois maiores produtores de soja no mundo, o Brasil (CUNHA et al., 2014) e os EUA e a China (CARRINGTON, 2019).

O investimento no sistema de cultivo, com incremento na quantidade e, também se possível, na qualidade da MOS, resultará na sustentabilidade do manejo da adubação com P. Os altos teores de MOS do presente estudo são atribuídos a processos pedogenéticos aliados à manutenção, por anos, da forrageira *Brachiaria brizantha* cv. *Marandú*, subutilizada. Assim, é necessário investir no sistema de produção visando a ciclagem de nutrientes, com destaque o P, para atender a sustentabilidade técnica, ambiental e socioeconômica da produção agrícola a curto e longo prazo, ou seja, manter o P residual do sistema produtivo, disponível para as culturas, ou em frações que tamponam o P disponível.

Após a safra 2016/2017 e 2017/2018, foi avaliado o P residual no sistema de produção, sendo representado pelo P nos resíduos culturais ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) (Figuras 3 B e 4 B) e pelo P disponível no solo após a safra, que foi obtido com uso dos extratores Mehlich I e  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (Figuras 3 C e D; e 4 C e 4 D). Com a aplicação do MAP a lanço e do SS na linha se obteve os maiores valores de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nos restos culturais (Figuras 3 B). Já na safra 2017/2018, a maior quantidade de P nos restos culturais foi obtida na área com a aplicação do ST a lanço e na linha (Figura 5 B). Assim, pode-se afirmar que com a aplicação do MAP a lanço e do SS na linha, nas condições (solo, clima e cultivar) da safra

2016/2017, e de ST, independente da forma de aplicação, para as condições da safra 2017/2018, houve maior eficiência em transformar o P inorgânico residual do fertilizante em P orgânico dos restos culturais, e com isso reduzir as perdas de P no solo por precipitação e, ou, adsorção.

O resultado da safra 2017/2018 é corroborado pela maior eficiência do uso do P residual da soja safra 2014/2015 (COUTO, 2018) pelo sorgo e *Brachiaria brizantha* cv. Piatã cultivadas em sucessão, na safrinha 2015 na área com aplicação do ST (BARBOSA et al., 2017). Esse P nos restos culturais, será transformado em P orgânico da matéria orgânica do solo, que será liberando lentamente no futuro aumentando assim O P nas frações do solo (BRUNETTO et al. 2011). A transformação do P inorgânico residual de culturas em P orgânico nos restos culturais é a principal forma de reduzir as perdas de P no solo, e aumentar a sustentabilidade do sistema de produção.

Alguns trabalhos avaliaram a eficiência de forrageiras em absorver o P residual da safra de diferentes fontes com o objetivo de reduzir as perdas por adsorção e os efeitos em cultivos sucessivos. Ramos et al. (2009) relataram que a *Brachiaria brizantha* foi mais eficiente em acumular P na parte aérea quando aplicado o ST e o FR de Arad, com recuperação de até 10% do P aplicado, comparado a outras forrageiras. Todavia para a soja cultivada em sucessão a essas forrageiras, e sem adubação fosfatada, a menor produtividade de grãos foi obtida sob a palhada da *Brachiaria brizantha*, e mostra que a taxa de retorno do fósforo recuperada por plantas de cobertura é mais lenta que o intervalo de tempo entre o cultivo da forrageira e da planta de safra (RODRIGUES et al., 2009). O feijoeiro cultivado em sucessão a *Brachiaria brizantha* também obteve as menores produtividades (RODRIGUES, 2006). Todavia, os maiores incrementos de P na fração orgânica total do solo foi obtido após o cultivo do milho (RODRIGUES, 2006), e também, neste caso se obteve a maior produção da soja (RODRIGUES et al., 2009) do feijoeiro (RODRIGUES, 2006) cultivado em sucessão. Na área de realização deste experimento, tanto o sorgo, quanto a *Brachiaria brizantha* cv. Piatã, cultivados na safrinha 2015 em sucessão a soja safra 2014/2015, foram eficientes em recuperar o P residual inorgânico da área com o ST (BARBOSA et al., 2017). E a produção da soja cultivada em sucessão as forrageiras na safra 2015/2016, apresentou a maior produtividade com a aplicação do ST aplicados na linha (COUTO, 2018).

Os maiores teores de P disponível residual no solo após a safra 2016/2017 foram nas áreas com a aplicação do FR e MAP a lanço, quando avaliado pelo Mehlich I, e nas áreas com aplicação do FR, MAP, ST e Controle, independente da forma de aplicação,

quando avaliado pelo extrator  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (Figuras 3 C e D, respectivamente). Na safra 2017/2018, os maiores teores de P residual disponível no solo foi obtido com aplicação de SS (P-MI) e FR ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), ambos aplicados a lanço (Figuras 4 C e D, respectivamente). As quantidades de P disponibilizadas pelos dois extratores foram diferentes, e pode ser pelo modo de extração dos diferentes extratores (SCHMITT et al., 2018).

Os altos teores P residual com a aplicação do MAP, tanto de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nos restos culturais, quanto de P disponível avaliado pelo extrator Mehlich I com a aplicação do MAP a lanço e de MAP, independente da forma de aplicação, avaliado pelo extrator  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (Figuras 3 B, C e D, respectivamente), é um indicativo de que com o uso dessa fonte não foi possível reverter a adubação fosfatada em produtividade de grãos (Figura 2 D), ou seja, baixa eficiência da fonte (Ef) MAP e de uso (EU) do P quando aplicado via MAP (Figuras 6 A e B, respectivamente). Já, os altos teores residuais de P disponível após a safra com a aplicação do FR a lanço (Figura 3 C) e FR, independente da forma de aplicação, (Figura 3 D), obtidos com os extratores Mehlich 1 e  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , respectivamente, podem ser explicados pela baixa reatividade desse fertilizante, em relação dos outros utilizados no presente trabalho, resultando em baixa eficiência da fonte (Ef) e de uso (EU) do P (Figuras 6 A e B).

O fosfato natural reativo é dependente da acidez do solo, causando restrição no uso desses fertilizantes após a realização da calagem (BORTOLUZZI et al., 2017). Além da acidez do solo, a solubilização do FR no solo depende, também, dos fatores dreno de Ca e P do solo e da planta. Neste experimento, o dreno P no solo pouco contribuiu para a solubilização do FR, explicado pelos altos teores de P orgânico e mesmo inorgânico (COUTO, 2018). O dreno Ca do solo e planta, possivelmente, também tenha contribuído pouco para a solubilização do FR, isso porque os teores de Ca antes do plantio das safras 2016/2017 e 2017/2018 estavam em níveis classificados como bom (RIBEIRO et al., 1999), atendendo a demanda da planta. Assim, para as condições de solo do presente trabalho, a possibilidade de resposta da soja ao FR seria baixa, em função da ausência de fatores no solo que contribuiria para a solubilização desse fertilizante.

Neste estudo foi possível observar comportamentos distintos para todas as variáveis analisadas durante as safras de 2016/2017 e 2017/2018. É importante salientar que fatores como cultivar semeada, distribuição hídrica, temperatura, época de semeadura e fotoperíodo podem influenciar o desenvolvimento e produtividade da cultura (FARIAS et al., 2007; CARMO et al., 2018). Contudo, em geral as fontes solúveis apresentaram os melhores resultados, sendo que a forma de aplicação não foi fator determinante para o

desempenho destas, sob Latossolo Vermelho Distrófico de alta fertilidade construída. Com base nos resultados de Couto (2018), e os obtidos no presente trabalho, as fontes fosfatadas MAP e o FR não obtiveram os melhores resultados técnicos. Levando-se em consideração a teoria da segurança alimentar, o uso de menor quantidade de fertilizante por unidade de área para a obtenção de maiores produtividades, de uma fonte com matéria-prima finita (WITHERS et al., 2018), e os resultados obtidos no presente trabalho, o uso do SS e do ST, são as fontes com maior eficiência técnica.

## 5. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, concluiu-se que as formas de aplicação dos fertilizantes fosfatados não alteraram a eficiência dos mesmos, e nem a produtividade de grãos de soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018. As fontes de fósforo SS e ST, independente da forma de aplicação, proporcionaram maior eficiência e produtividade de grãos da soja nas safras 2016/2017 e 2017/2018, e o MAP somente na safra 2017/2018.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao CNPq pelo financiamento do projeto e a parceria com a Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano (COMIGO), Ao IF Goiano pelo apoio financeiro na tradução e submissão do artigo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. M. C.; MAGALHÃES, J. V.; VASCONCELOS, C. A.; NOVAIS, R. F.; BAHIA FILHO, A. F. C.; FRANÇA, G. E.; FRANÇA, C. C. M. Acúmulo de nitrogênio e de fósforo em plantas de milho afetadas pelo suprimento parcial de fósforo às raízes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 299-305, 1999.

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p. 537-562.

ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 349-353, 1992.

ANTONANGELO, J.; ALLEONI, R. F. F. L.; OLIVEIRA JUNIOR, A.; ZHANG, H. Soybean Yield Response to Phosphorus Fertilization in an Oxisol under Long-Term No-Till Management. **Soil Science of American Journal**, v. 83, p. 0-0, 2019.

ANTUNOVIĆ, M.; RASTIJA, M.; SUDARIĆ, A.; VARGA, I.; JOVIĆ, J. Response of soybean to phosphorus fertilization under drought stress conditions. **Növénytermelés**, v. 61, n. 2, p. 117-120, 2012. Disponível em: <[https://bib.irb.hr/datoteka/576595.117-120Alpe\\_adria\\_2012.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/576595.117-120Alpe_adria_2012.pdf)>. Acesso em 23 de out. de 2020.

BARBOSA, K. P.; RODRIGUES, C. R.; TRINDADE, P. R.; COUTO, R. L.; SILVA, R. S.; VANIN, Á.; MENEZES, C. C. E.; ABREU, T. P.; NASCIMENTO JÚNIOR, L. F.; CHAGAS, M. G. K.; RODRIGUES, T. M.; CAVALCANTE, T. J. Residue of Phosphorus Sources Broadcast and Applied on Rows in Forages during Off-Season Crops. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, p. 45-57, 2017.

BARBOSA, N. C.; ARRUDA, E. M.; BROD, E.; PEREIRA, H. S. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**, v. 31, p. 87-95, 2015.

BEZERRA, R.P.M.; PERDA, A.; PEREIRA, M.G.; PERIN, A. Frações de fósforo e correlação com atributos do solo em sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado de Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, p. 1287-306, 2015.

BORTOLUZZI, F. M.; CABRAL, C. E. A.; MACHADO, R. A. F.; ABREU, J. G.; CABRAL, C. H. A.; BARROS, L. V. Fosfato natural reativo aplicado em épocas distintas e associado a fertilizantes nitrogenados afetam a produção de capim-marandu. **Boletim de Indústria Animal**, v. 74, p. 9-16, 2017.

BREVILIERI, R. C. **Adubação fosfatada na cultura da soja em Latossolo Vermelho cultivado há 16 anos sob diferentes sistemas de manejo**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Aquidauana, 43 p. 2012.

BRUNETTO, G.; VENTURA, M.; SCANDELLARI, F.; CERETTA, C. A.; KAMINSKI, J.; MELO, G. W. B.; TAGLIAVINI, M. Nutrients release during the decomposition of mowed perennial ryegrass and white clover and its contribution to nitrogen nutrition of grapevine. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 90, p. 299-308, 2011.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAEZ V, V. H.; BARROZ, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: SBCS, 2007. p. 769-850.

CARMO, E. L.; ROCHA, A. G. C.; SIMON, G. A.; SILVA, A. G.; BRAZ, G. B. P. Adensamento de plantas e épocas de cultivo de soja em condições de cerrado. **Colloquium Agrariae**, v. 14, p. 01-12, 2018.

CARRINGTON, D. 2019. **Phosphate fertiliser 'crisis' threatens world food supply**. London: The Guardian. Disponível em <<https://www.theguardian.com/environment/2019/sep/06/phosphate-fertiliser-crisis-threatens-world-food-supply>>. Acesso em: 19 de set. de 2019.

CHEN, C. R.; CONDRON, L. M.; DAVIS, M. R.; SHERLOCK, R. R. Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. **Plant Soil**, v. 220, p. 151-163, 2000.

CHIEN, S. H.; TEIXEIRA, L. A.; CANTARELLA, H.; REHM, G. W.; GRANT, C. A.; GEARHART, M. M. Agronomic effectiveness of granular nitrogen/phosphorus fertilizers containing elemental sulfur with and without ammonium sulfate: A review. **Agronomy Journal**, v. 108, p. 1203– 1213, 2016.

CLIMA Rio Verde. 2020. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/goias/rio-verde-4473/>>. Acesso em: 13 de out. de 2020.

COUTO, R. L. **Fontes e formas de aplicação de fósforo sobre suas frações no solo e a produtividade da soja**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 64 p. 2018.

CUNHA, J. F.; CASARIN, V.; FRANCISCO, E. A. B.; PROCHNOW, L. I. **Balanco de nutrientes na agricultura Brasileira**. Informações Agronômicas, Piracicaba, v. 145, p. 1-13, 2014.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, 2009. 627 p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, 2018. 356 p.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10p (Embrapa Soja. Circular Técnica, 48).

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. 2018. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portuguese). R package version 1.2.0**. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>>. Acesso em: 16 de jun. de 2020.

FONTOURA, S. M. V.; VIEIRA, R. C. B.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; MORAES, R. P.; Eficiência técnica de fertilizantes fosfatados em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1907-1914, 2010.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A.L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução da redução de receita pela seca**. Londrina, Embrapa Soja, 2009. 39 p. (Embrapa Soja. Documentos, 314).

FRANDOLOSO, J. F.; LANA, M. C.; FONTANIVA, S.; CZYCZA, R. V. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Revista Ceres**, v. 57, p. 686-694, 2010.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v. 8, p. 141-187.

GRANT, C. A.; PLATEN, D. N.; TOMAZIEWICZ, D. J.; SHEPPARD, S. C. **A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n. 95, 2001.

JARRELL, W. M.; BEVERLY, R. B. The dilution effect in plant studies. **Advances in Agronomy**, v. 34, p. 197-224, 1981.

KÖPPEN, W. **Grundriss der Klimakunde**: Outline of climate science. Berlin: Walter de Gruyter, 1931. 388 p.

KURIHARA, C. H.; VENEGAS, V. H. A.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; STAUT, L. A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. **Revista Ceres**, v. 60, p. 412-419, 2013.

LACERDA FILHO, J.V.; REZENDE, A.; SILVA, A. **Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal: Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil, escala 1:500.000**. Goiânia/GO: CPRM. 200p. 1999.

LARA, I.C. V.; MOREIRA, A.; CABRERA, R. A. D.; MORAES, L. A. C. Eficiência agronômica de fontes e doses de fósforo no cultivo da soja em solos com diferentes classes texturais. In: Jornada Acadêmica da Embrapa Soja, 12, 2017, Londrina, **Resumos...** Londrina: Embrapa Soja, 2017, p. 76-80.

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

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação.** 3.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 594 p.

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

MARANGUITI, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. **Catena**, v. 149, p. 385-393, 2017.

MOTOMIYA, W. R.; FABRÍCIO, A. C.; MARCHETTI, M. E. Métodos de aplicação de fosfato na soja em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 307-312, 2004.

MUMBACH, G. L.; GATIBONI, L. C.; BONA, F. D. de; SCHIMDT, D. E.; CORRÊA, J. C.; GABRIEL, C. A.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; IOCHIMS, D. A. Agronomic efficiency of organomineral fertilizer in sequential grain crops in southern Brazil. **Agronomy Journal**, v. 112, p. 3037-3049, 2020.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural waters. **Analytical Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

NETO, F. A.; GRAVINA, G. A.; SOUZA, N. O. S.; BEZERRA, A. A. C. Adubação fosfatada na cultura da soja na microrregião do Alto Médio Gurguéia. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 266-271, 2010.

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

NUNES, R. S; SOUSA, D. M. G; GOEDERT, W. J; VIVALDI, L. J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p. 877-888, 2011.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, v. 34, p. 1779-1784, 2004.

POTTKER, D. **Aplicação de fósforo no sistema plantio direto**. Embrapa Trigo, Boletim de Pesquisa, v. 2. Passo Fundo: Embrapa, 1999. 32 p.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2020. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Áustria. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 16 de jun. 2020.

RAMOS, S. J.; FAQUIN, V.; RODRIGUES, C. R.; SILVA, C. A.; BOLDRIN, P. F. Biomass production and phosphorus use of forage grasses fertilized with two phosphorus sources. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 335-343, 2009.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V.; V. H. **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: CFFEMG, 1999, 359 p.

RODRIGUES, C. R. **Frações de fósforo e produção da soja e do feijoeiro em sucessão a gramíneas adubadas com diferentes fertilizantes fosfatados**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 113 p. 2006.

RODRIGUES, C. R.; FAQUIM, V.; ÁVILA, F. W.; RODRIGUES, T. M; BALIZA, D. P.; OLIVEIRA, E. A. B. Crescimento e acumulação de fósforo pela soja cultivada em sucessão a diferentes gramíneas forrageiras adubadas com super fosfato triplo e fosfato reativo de Arad. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1486-94, 2009.

RÖMHELD, V. Diagnosis of Deficiency and Toxicity of Nutrients. In: MARCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3<sup>th</sup> ed. Academic Press: London, 2012. p. 299-314.

SANTINI, J. M. K.; BUZETTI, S.; PERIN, A.; CASTRO, C. F. S.; FURQUIM, L. C.; NUNEZ, D. N. C.; SILVEIRA, F. O.; LOPES FILHO, L. C.; CABRAL, A. C. Concentrações de nutrientes nos tecidos de grãos de soja, influenciados por fontes e doses fosfatadas em solo de alta fertilidade e em cultivo no cerrado. **Cientific@ Multidisciplinary Journal**, v. 7, p. 30-37, 2019.

SANTOS, A. S. **Morfofisiologia da soja submetida a diferentes fontes de calcário e fósforo no cerrado piauiense**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, 55 f. 2016.

SCHMITT, D. E.; GATIBONI, L. C.; DALL'ORSOLETTA, D. J.; brunetto, g. Formation of ternary organic acids-Fe-P complexes on the growth of wheat (*Triticum aestivum*). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 702-706, 2018.

SILVA, F. N.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; MAGALHÃES, C. A. S.; CARNEIRO, D. N. M. Crescimento e produção de grãos de soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1220-1227, 2009.

SILVA, T. O.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; PALUDO, V. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, p. 1315-1326, 2011.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 102, p. 1-16, 2003. Encarte técnico.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004, 416 p.

SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. S., REIN; T. A.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. Manejo do fósforo na região do cerrado. In: FLORES, R. A.; CUNHA, P. P. (Eds.). **Práticas de**

**manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado.** Goiânia: UFG, 2016. p. 291-357.

STAMMER, A. J.; MALLARINO, A. P. Plant Tissue Analysis to Assess Phosphorus and Potassium Nutritional Status of Corn and Soybean. **Soil Science of American Journal**, v. 82, p. 260-270, 2018.

TRINDADE, P. R. **Métodos de estimativa de necessidade de correção de um Neossolo Quartzarênico.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 51 p. 2016.

WANG, X.; KOMATSU, S. Proteomic Analysis of Calcium Effects on Soybean Root Tip under Flooding and Drought Stresses. **Plant and Cell Physiology**, v. 58, p.1405-1420, 2017.

WARNES, G. R.; BOLKER, B.; BONEBAKKER, L. GENTLEMAN, R.; HUBER, W.; LIAW, A.; LUMLEY, T.; MAECHLER, M.; MAGNUSSON, A.; MOELLER, S.; SCHWARTZ, M.; VENABLES, B. 2020. **Gplots: Various R Programming Tools for Plotting Data. R package version 3.0.3.** Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=gplots>>. Acesso em: 16 de jun. 2020.

WARNES, G. R.; BOLKER, B.; LUMLEY, T.; JOHNSON, R. C. Contributions from JOHNSON, R. C. are Copyright SAIC-Frederick, Inc. Funded by the Intramural Research Program, of the NIH, National Cancer Institute and Center for Cancer Research under NCI Contract NO1-CO-12400. 2018. **Gmodels: Various R Programming Tools for Model Fitting. R package version 2.18.1.** Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=gmodels>>. Acesso em: 16 de jun. 2020.

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; CARVALHO, T. S.; GUILHERME, L. R. G.; BENITES, V. D. M.; GATIBONI, L. C.; SOUSA, D. M. G.; NUNES, R. D. S.; ROSOLEM, C. A.; ANDREOTE, F. D.; OLIVEIRA, A.; COUTINHO, E. L. M.; PAVINATO, P. S. Transitions to Sustainable Management of Phosphorus in Brazilian Agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1-13, 2018.

## CAPÍTULO II

# **FRAÇÕES DE FÓSFORO EM LATOSSOLO VERMELHO COM CULTIVO SUCESSIVO DE SOJA ADUBADA COM DIFERENTES FONTES E FORMAS DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES FOSFATADOS**

## RESUMO

O fracionamento de fósforo (P) é uma metodologia que vem sendo utilizada para determinar a dinâmica deste nutriente no solo a fim de proporcionar informações que colaborem para o uso eficiente deste. O comportamento do P nas frações do solo pode ser influenciadas pela adubação fosfatada e seu modo de aplicação. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência das fontes de fertilizantes fosfatos e suas formas de aplicação na dinâmica do P no solo. O experimento foi realizado em solo classificado como Latossolo Vermelho Distrófico. A área experimental possui histórico de quatro cultivos sucessivos de soja (2014/2015, 2015/2016, 2016/2017 e 2017/2018), com aplicação na linha e a lanço de fertilizantes fosfatados, sendo apresentados os resultados das duas últimas safras. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso em esquema fatorial  $4 \times 2 + 1$  sendo, quatro fontes de fósforo (superfosfato simples e triplo, monoamônio fosfato e fosfato reativo) e duas formas de aplicação (na linha e a lanço) e a controle (sem adubação fosfatada). Realizou-se a extração sequencial das frações de P pelo método de Hedley et al. (1982), e modificado por Chen et al. (2000) nas amostras coletadas na camada de 0 a 0,1 m de camada. As frações de P no solo alteraram com as fontes e as formas de aplicação, sendo que a aplicação a lanço aumenta os teores das frações lábeis e de baixa labilidade de P inorgânico e orgânico no solo, principalmente quando aplicadas as fontes de maior solubilidade como o monoamônio fosfato, superfosfato simples e superfosfato triplo.

**Palavras-chave:** Adubos fosfatados, fracionamento, labilidade, adsorção, precipitação.

## ABSTRACT

Phosphorus fractionation (P) is a methodology that has been used to determine the dynamics of this nutrient in the soil in order to provide information that contributes to its efficient use. The P behavior in soil fractions can be influenced by phosphate fertilization and its mode of application. The aim of this study was to evaluate the influence of phosphate fertilizer sources and their forms of application on soil P dynamics. The experiment was carried out in soil classified as Red Dystrophic Latosol. The experimental area has a history of four successive soybean crops (2014/2015, 2015/2016, 2016/2017 and 2017/2018), with application in the line and haul of phosphate fertilizers, with the results of the last two harvests being presented. The experimental design was in randomized blocks in a  $4 \times 2 + 1$  factorial scheme, being four sources of phosphorus (single and triple superphosphate, monoammonium phosphate and reactive phosphate) and two forms of application (in line and in haul) and control (without phosphate fertilization). Sequential extraction of P fractions was carried out by the method of Hedley et al. (1982), and modified by Chen et al. (2000) in samples collected at 0 to 0.1 m layer. The P fractions in soil changed with sources and forms of application, and the application by haul increases the contents of the labile and low lability fractions of inorganic and organic P in the soil, especially when applied to the sources of greater solubility such as monoammonium phosphate, single superphosphate and triple superphosphate.

**Keywords:** Phosphate fertilizers, fractionation, lability, adsorption, precipitation.

## 1. INTRODUÇÃO

Em solos tropicais e subtropicais altamente intemperizados, o incremento da produtividade vegetal está diretamente associado à fertilização com fósforo (P). Isso se deve a alta capacidade que esses solos têm em reter o P na fase sólida do solo (NOVAIS et al., 2007; RODRIGUES et al., 2016; ABDALA et al., 2018) resultando na baixa disponibilidade deste nutriente as plantas, fazendo-se necessário a intervenção com adubação fosfatada.

O P no solo se encontra nas formas orgânica (Po) e inorgânica (Pi) podendo ser encontrados como fósforo lábil e não lábil. A dinâmica das formas de P no solo (Po e Pi) assim como sua labilidade e consequente disponibilidade para as plantas, é dependente de fatores como: textura e mineralogia do solo; dose, fonte e modo de aplicação dos fertilizantes fosfatados; sistema de uso e manejo do solo; habilidade da planta em utilizar reservas de P das formas menos lábeis e atividade microbiana (SOLOMON et al., 2002; TIECHER et al., 2012; MARANGUIT et al., 2017; SOLTANGHEIS et al., 2018; OHLAND, 2019).

Em solos com baixa ou nenhuma adição de fertilizantes fosfatados, as formas Po são as principais responsáveis pelo fornecimento deste nutriente às plantas (GATIBONI et al., 2013). Solos pouco intemperizados ou com ocorrência de fertilização grande parte do P disponível para a planta é tamponado por frações inorgânicas lábeis, enquanto em solos altamente intemperizados ou não fertilizados, a disponibilidade de P dependente muito de formas inorgânicas e orgânicas de menor a pouca labilidade (TIESSEN et al., 1984; BECK e SANCHES, 1994).

Devido à complexidade do comportamento do P no solo, o fracionamento químico sequencial (HEDLEY et al., 1982) é uma técnica que tem contribuído para o entendimento da disponibilidade e solubilidade do P total no solo através de diferentes soluções extratoras (SILVA e RAIJ, 1999). No Brasil um dos métodos bastante utilizado é o fracionamento desenvolvido por Hedley et al. (1982). Esse método permite a separação das formas Po e Pi, desde as mais lábeis até as mais recalcitrantes do solo, incluindo o P da biomassa microbiana (GATIBONI et al, 2013). O fracionamento de Hedley et al. (1982) tem sido utilizado em estudos que envolvem adubação fosfatada com diferentes fontes de P para elucidar a influência dos fertilizantes no comportamento das formas de P nas frações do solo.

Em estudo com fracionamento de P, Rodrigues et al. (2009), verificaram que a aplicação de superfosfato triplo proporcionou maior acúmulo de Pi e Po na fração lábil e pouco lábil, e a aplicação de fosfato reativo de Arad incrementou os teores das frações de P precipitado ao Ca. Rosset et al. (2016) evidenciaram que o manejo da adubação fosfatada e da matéria orgânica do solo em função do sistema de plantio direto proporcionou aumento nos teores de todas as frações de Pi, Po lábil, moderadamente lábil e moderadamente resistente nas camadas superficiais do solo. Beauchemin et al (2003), avaliando as formas de P em solos adubados, observaram, através do fracionamento químico que o P estava associado em maior quantidade com alumínio e/ou ferro nos solos de pH baixo e ao cálcio nos solos alcalinos.

Soltangheisi et al. (2019) avaliando os efeitos do superfosfato triplo (ST) e dos fosfatos reativos de Gafsa e Bayovár associados a torta de filtro em duas safras de cana-de-açúcar através do fracionamento de P, relataram que as fontes de fosfato inorgânico foram eficazes para manter níveis adequados de P no solo após dois anos, especialmente o ST, independentemente da dose. Contudo, com a aplicação dos fosfatos reativos houve acúmulo do P na fração moderadamente lábil extraída, e não ocorreu solubilização. Silva et al. (2018) verificaram em seu estudo que, a aplicação de ST em companhia de palhada de capim-Marandu proporcionaram aumento do P lábil para cultura do feijoeiro. Os resultados acima citados reforçam a importância sobre influência da adubação fosfatada e do manejo adequado do solo sob as frações de P no solo.

Tendo em vista, que o fracionamento de P permite compreender a dinâmica deste nutriente no solo, sendo possível identificar como as formas de Po e Pi e sua labilidade contribuem para o fornecimento de P às plantas, este estudo teve por objetivo avaliar a influência dos fertilizantes fosfatos e suas formas de aplicação sobre as frações de P no solo em experimento de longa duração na terceira e quarta safras.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizadas as extrações sequenciais das frações de fósforo (P) do solo pelo método proposto por Hedley et al. (1982) e modificado por Chen et al. (2000), em que o P em solução foi obtido com o extrator  $\text{NH}_4\text{Cl}$  a  $1 \text{ mol}_e \text{ L}^{-1}$  e não pelo método da resina.

O solo para a extração sequencial das frações de P foram coletadas na camada de 0 a 0,10 m. Após a colheita dos experimentos das safras da soja 2016/2017 e 2017/2018 (Capítulo 1). Os teores médios das frações de P antes da safra 2016/2017 constam na Tabela 1 (COUTO, 2018).

**Tabela 1.** Caracterização das frações de P ( $\text{mg kg}^{-3}$ ) no solo na camada de 0,0 – 0,10 m antes do plantio da soja na safra 2016/2017 (COUTO, 2018).

Frações ( $\text{mg dm}^{-3}$ )	Lanço				Linha				Controle
	FR	MAP	SS	ST	FR	MAP	SS	ST	
<sup>1</sup> P-total	1893,5	1721,8	1970,5	2066,9	1615,5	1968,2	2094,7	1955,7	1688,4
Pi-total	861,1	783,6	819,9	820,5	778,2	831,6	907,8	841,9	785,9
Po-total	1032,4	938,3	1150,6	1246,5	837,3	1136,6	1186,8	1113,8	902,5
Pi-sol	10,9	5,5	6,4	6,3	8,2	5,9	6,6	8,3	4,4
Pi-Lábil	21,0	19,9	25,1	22,8	11,0	28,7	27,4	28,5	13,1
Pi-NLábil	314,1	312,3	329,1	322,2	281,4	323,7	388,2	345,2	288,2
Pi-Ca	69,6	29,8	27,4	29,6	51,0	27,7	37,0	33,6	25,3
Pi-ocluso	445,4	416,0	431,9	439,6	426,6	445,5	448,6	426,3	454,9
Po-mic	24,4	14,5	9,5	10,7	50,2	0,0	17,5	27,8	59,9
Po-Lábil	94,8	103,0	125,4	107,0	66,4	126,6	131,8	111,9	77,0
Po-NLábil	913,2	820,8	1015,7	1128,8	720,7	1010,0	1037,5	974,1	765,6

<sup>1</sup>Fósforo total (P-total); fósforo orgânico total (Po-total); fósforo inorgânico total (Pi-total); fósforo inorgânico na solução do solo (Pi-sol); fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil); fósforo inorgânico moderadamente ou pouco lábil (Pi-NLábil); fósforo inorgânico precipitado com cálcio (Pi-Ca); fósforo inorgânico ocluso (Pi-ocluso); fósforo orgânico microbiano (Po-mic); fósforo orgânico lábil (Po-Lábil) e fósforo orgânico moderadamente ou pouco lábil (Po-NLábil).

O delineamento dos experimentos foi em blocos ao acaso em esquema fatorial 4 x 2 + 1 sendo, quatro fontes de fósforo (Fosfato Reativo de Marrocos (FR) – 30% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (CNA+ $\text{H}_2\text{O}$ ); Monoamônio Fosfato (MAP) 52% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (CNA+ $\text{H}_2\text{O}$ ); Superfosfato Simples (SS) – 21% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (CNA+ $\text{H}_2\text{O}$ ) e o Superfosfato Triplo (ST) 46% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (CNA+ $\text{H}_2\text{O}$ ), duas formas de aplicação (na linha de plantio e a lanço), e o Controle sem adubação fosfatada, com quatro repetições. As parcelas consistiam de 10 linhas de soja espaçadas a 0,5 m, perfazendo 5 metros de comprimento por 5 metros de largura, totalizando uma área de 25  $\text{m}^2$ .

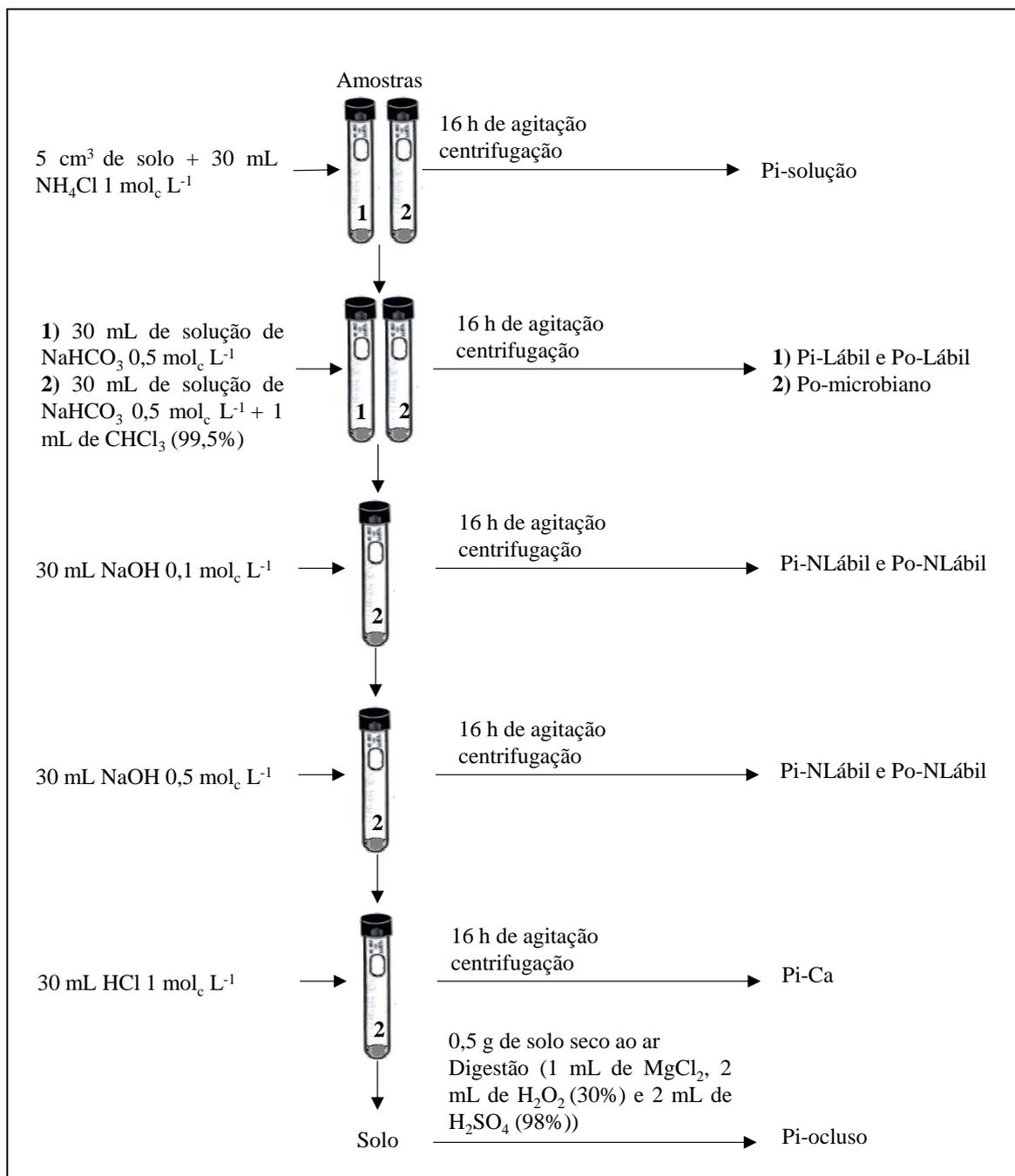
Ao final de cada safra, coletou-se o solo, na camada de 0,0 – 0,10 m. A amostra simples da camada avaliada foi composta por uma faixa de solo entre a linha e a entre linha de plantio (CANTARUTTI et al., 2007). Foram realizadas três amostragens simples

por parcela, que foram misturadas para a retirada de uma amostra composta representativa de cada parcela. As amostras foram secadas ao ar e peneiradas em tamis com malha de 2 mm, e acondicionadas em sacos plásticos previamente identificados. A amostragem do solo foi realizada somente na camada de 0 a 0,10 m, em função da camada de influência dos fertilizantes aplicados na linha a 0,05 a 0,07 m (COUTO, 2018).

Posteriormente, as amostras foram destinadas a extração sequencial de fósforo pelo método de Hedely et al. (1982), modificado por Chen et al. (2000). Foi utilizada a extração sequencial na ordem dos extratores sugerida por Hedley et al., (1982) ( $\text{NH}_4\text{Cl}$   $1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$   $\rightarrow$   $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$   $\rightarrow$   $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$   $\rightarrow$   $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$   $\rightarrow$   $\text{HCl}$   $1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$   $\rightarrow$  Digestão sulfúrica), substituindo a resina pelo  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$  na primeira extração, conforme sugerido por Chen et al. (2000) (Anexo 1).

As frações inorgânicas foram classificadas conforme Gatiboni et al. (2013) como: 1) P extraído pelo  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ : P em solução (P-sol); 2) P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ : P inorgânico lábil (Pi-Lábil); 3) P extraído pelo  $\text{NaOH}$   $0,1$  e  $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ : P inorgânico moderadamente a pouco lábil (Pi-NLábil) podendo compreender desde o P adsorvido a superfície dos coloides por diferentes ligações (monodentado, bidentado e binuclear) e, ou, precipitados com Al e Fe na solução do solo; 4) P extraído pelo  $\text{HCl}$   $1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ : P inorgânico precipitado com Ca formado diferentes espécies iônicas e 5) o P extraído por digestão sulfúrica,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 65% (1:1 v/v solo:solução extratora): P inorgânico ocluso e pequenas frações de P precipitado com Ca não extraídos pelo  $\text{HCl}$  (P-occluso).

As frações de P ligado a compostos orgânicos, também foram classificadas conforme o extrator (GATIBONI et al., 2013) sendo: 1) P orgânico microbiano, que equivale ao P na biomassa microbiana viva, extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$  +  $\text{CHCl}_3$ : P orgânico microbiano (Po-mic); 2) P extraído pelo  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ : P orgânico lábil (Po-Lábil) e o 3) P orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  a  $0,1$  e  $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ : P orgânico moderadamente a pouco lábil (Po-NLábil). A Figura 1 ilustra o esquema de extração sequencial anteriormente descrito segundo metodologia Hedely et al. (1982), modificado por Chen et al. (2000).



**Figura 1.** Esquema de fracionamento de fósforos inorgânico, orgânico e microbiano do solo, segundo método proposto por Hedley et al. (1982) e modificações sugeridas por Chen et al. (2000). Fonte: Adaptado de Gattiboni et al (2013).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de agrupamento de médias média (Scott Knott a 1 e 5% de probabilidade) para os tratamentos dentro do fatorial e por contrastes ortogonais (Teste de F a 5% de probabilidade) entre os tratamentos do fatorial e controle.

Foi realizada a correlação entre frações de P no solo obtidos antes e cada safra e a produtividade da safra e os teores de P disponíveis com os extratores Mehlich I e NH<sub>4</sub>Cl.

Os dados das frações de P no solo antes da safra 2016/2017 foram obtidos de COUTO (2018).

As análises estatísticas foram realizadas no programa R 4.0.1 para Windows (R CORE TEAM, 2020) e com os pacotes ExpDes.pt 1.2.0 (FERREIRA et al., 2018), gplots 3.0.3 (WARNES et al., 2020) e gmodels 2.18.1 (WARNES et al., 2018).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Frações do fósforo após a safra 2016/2017

O P total do solo (P-total) na safra 2016/2017 variou em função das diferentes fontes utilizadas (Tabela 2). Houve incremento no P-total do solo com a aplicação das fontes Superfosfato Triplo (ST), Superfosfato Simples (SS) e do fosfato reativo de Marrocos (FR), os quais diferiram do Controle sem adubação fosfatada (Figura 2). A variação encontrada no P total com a aplicação do MAP, por mais que positiva não diferiu estatisticamente do controle e foi o menor valor obtido entre os fertilizantes aplicados na safra 2016/2017 (Figura 2).

**Tabela 2.** Resumo da ANOVA (F calculado) das variáveis avaliadas na Safra 2016/2017.

Fontes de Variação	Bloco	Fonte(F)	Forma de Aplicação(FA)	F*FA	F*FA vs. Controle	CV(%)	$\bar{x}$
<b>P-total</b>	1,35 <sup>ns2</sup>	3,85*	3,92 <sup>ns</sup>	1,52 <sup>ns</sup>	16,60**	23,84	1.745,21
<b>Po-total</b>	1,34 <sup>ns</sup>	2,83*	3,74 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	12,00**	37,01	847,43
<b>Pi-total</b>	0,65 <sup>ns</sup>	4,57**	1,61 <sup>ns</sup>	2,39 <sup>ns</sup>	12,52**	19,17	897,77
<b>Pi-sol</b>	0,16 <sup>ns</sup>	4,55**	0,10 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	0,24 <sup>ns</sup>	32,26	12,36
<b>Pi-Lábil</b>	1,23 <sup>ns</sup>	5,16**	3,75 <sup>ns</sup>	3,22*	7,80**	47,54	11,25
<b>Pi-NLábil</b>	3,41**	1,24 <sup>ns</sup>	1,81 <sup>ns</sup>	2,72 <sup>ns</sup>	18,00**	22,21	424,60
<b>Pi-Ca</b>	0,03 <sup>ns</sup>	13,5**	3,00 <sup>ns</sup>	1,60 <sup>ns</sup>	5,80*	35,44	41,03
<b>Pi-ocluído</b>	0,40 <sup>ns</sup>	11,51**	0,65 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>ns</sup>	3,01 <sup>ns</sup>	32,57	408,54
<b>Po-mic</b>	0,17 <sup>ns</sup>	1,49 <sup>ns</sup>	15,32**	5,93**	2,52 <sup>ns</sup>	77,36	54,42
<b>Po-Lábil</b>	2,39*	16,20**	49,80**	4,06**	28,92**	31,47	60,38
<b>Po-NLábil</b>	1,22 <sup>ns</sup>	2,80*	1,08 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	9,61**	40,38	732,63

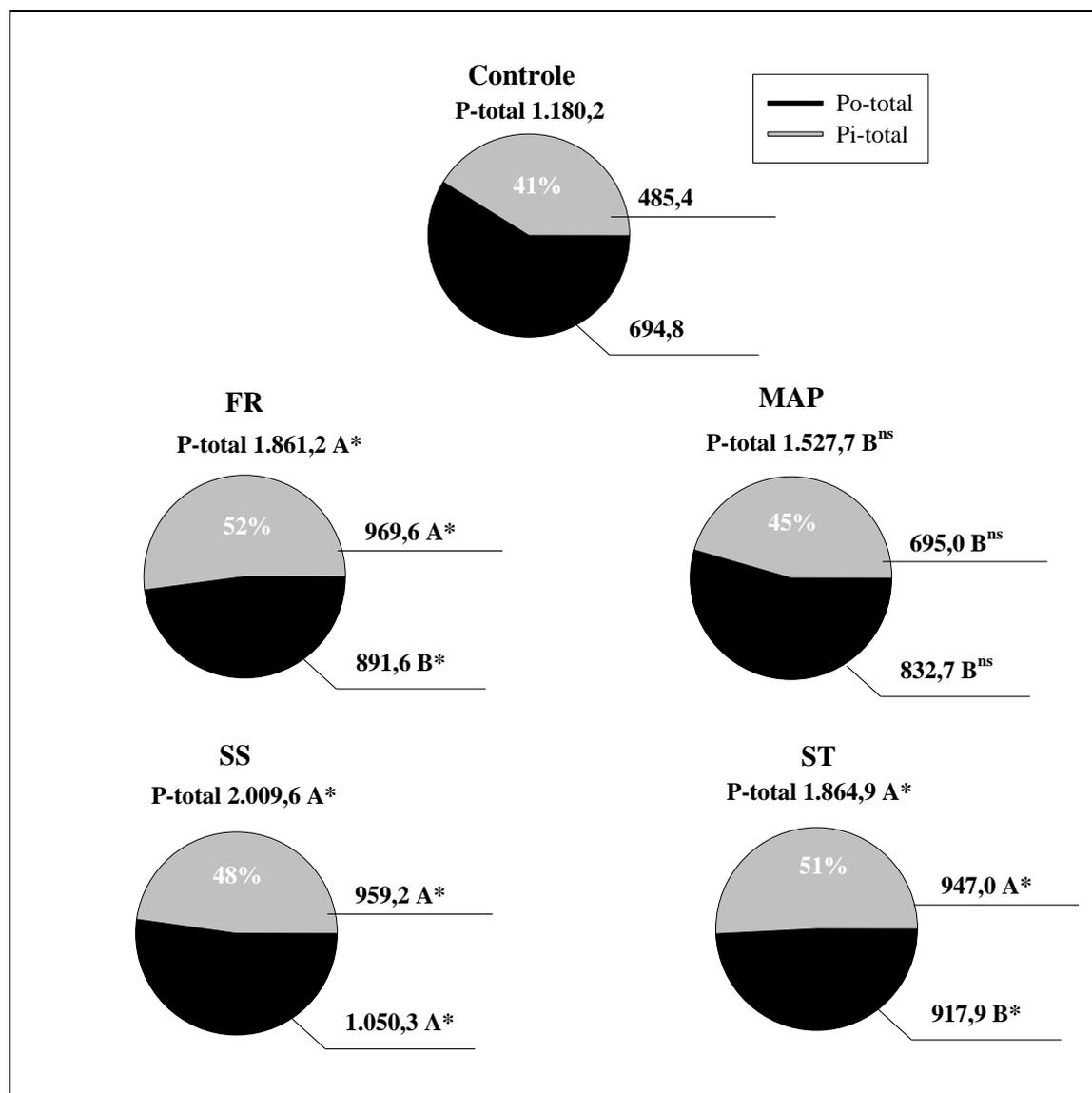
<sup>1</sup>Fósforo total (P-total); fósforo orgânico total (Po-total); fósforo inorgânico total (Pi-total); fósforo inorgânico na solução do solo (Pi-sol); fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil); fósforo inorgânico moderadamente ou pouco lábil (Pi-NLábil); fósforo inorgânico precipitado com cálcio (Pi-Ca); fósforo inorgânico ocluído (Pi-ocluído); fósforo orgânico microbiano (Po-mic); fósforo orgânico lábil (Po-Lábil); fósforo orgânico moderadamente ou pouco lábil (Po-NLábil).

<sup>2</sup>\*\* e <sup>ns</sup> Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.

O P-total do solo é composto pelas frações de P inorgânico e orgânico (Pi-total e Po-total), que se subdividem em outras frações em função da labilidade (GATIBONI et al., 2013). A alteração dos teores do P-total no solo, refletiu na variação do P orgânico total (Po-total), que alterou em função das fontes (Tabela 2) e obteve os menores valores com a aplicação do MAP (Figura 2).

Já, a alteração do P inorgânico total do solo (Pi-total), que também variou em função das fontes (Tabela 2), obteve os maiores valores somente com a aplicação do SS (Figura 2). Destaca-se que o P-total, Pi-total e o Po-total do solo foi maior em relação a área sem adubação fosfatada (Controle), somente com a aplicação do FR, SS e ST (Figura

2). Somente com a aplicação do FR houve maior proporção do Po em relação ao Pi (Figura 2).



**Figura 2.** Efeito das fontes (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) sobre os teores de fósforo total (P-total) e das frações de fósforo inorgânico total (Pi-total) e fósforo orgânico total (Po-total) em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVD) após a colheita da safra 2016/2017. Letras maiúsculas distinguem as fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação, ou independente da forma de aplicação. \*\*, \* e <sup>ns</sup> Variação significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

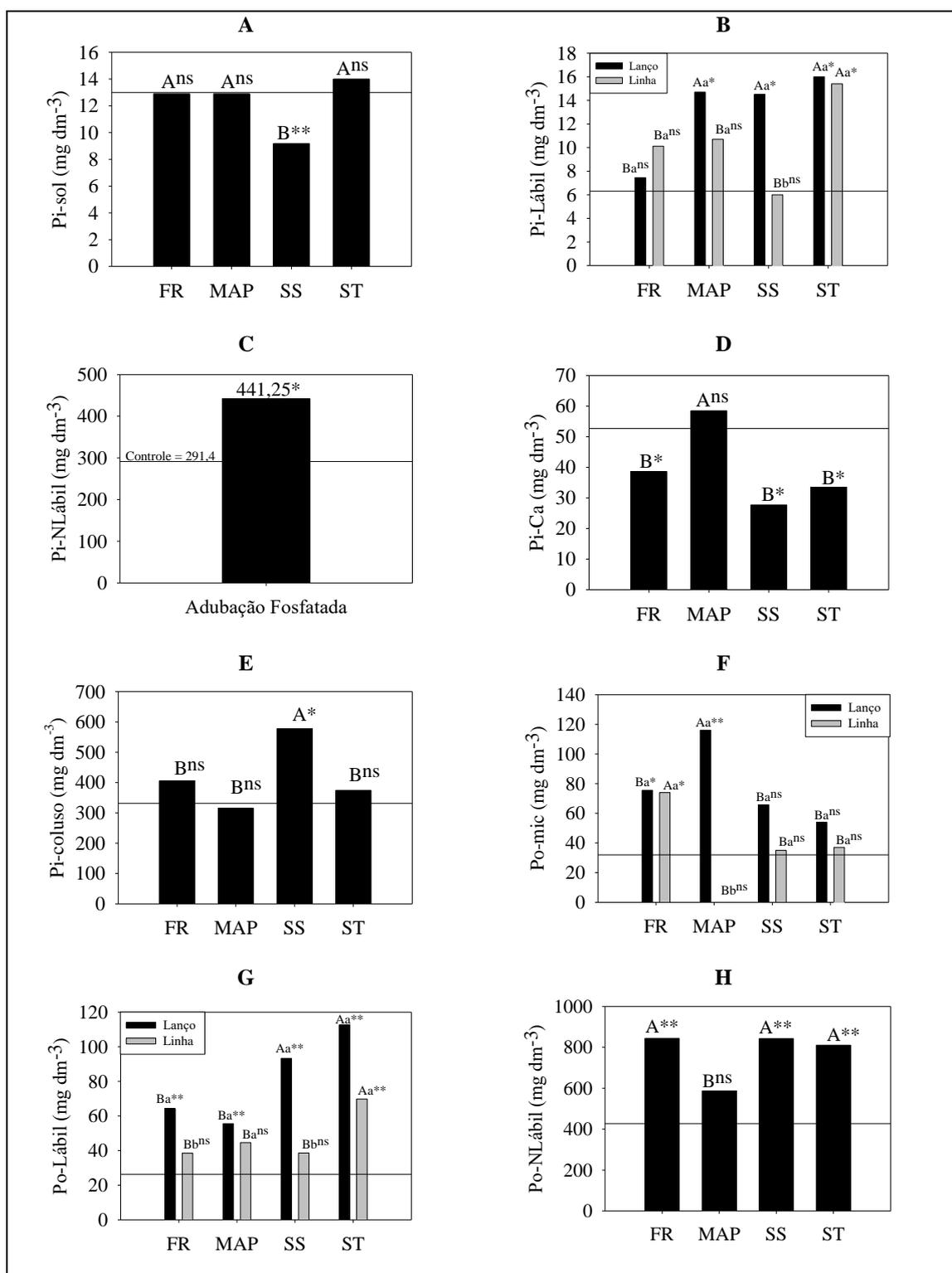
O maior incremento do Po-total com o FR se deve a aplicação contínua em 3 safras consecutivas e a menor exportação de P pelas plantas cultivadas com a aplicação dessa fonte. Com o maior residual no solo, há a possibilidade de maior utilização do P pela microbiota e pelas plantas espontâneas de entressafra, explicando a maior proporção de Po somente com a aplicação dessa fonte.

Dentro do Pi-total do solo hácinco subfrações estimadas pela extração sequencial de Hedley et al. (1962) (GATIBONI et al., 2013): o P em solução (Pi-sol), o P inorgânico lábil (Pi-Lábil), o P inorgânico moderadamente a pouco lábil (Pi-NLábil), o P precipitado com Ca (Pi-Ca) e o P ocluso (Pi-occluso).

Todas as subfrações de Pi no solo alteraram com as fontes de P utilizadas, com exceção do Pi-NLábil (Tabela 2). O Pi-Lábil no solo também variou em função da interação entre as fontes e a forma de aplicação dessas (Tabela 2).

O Pi-sol diferiu somente na área com aplicação do SS, em que foi obtido o menor valor em relação as demais fontes e o controle. Na fração Pi-Lábil, quando os fertilizantes solúveis (MAP, SS e ST) foram aplicados a lanço foram obtidos os maiores valores, justificado pelo maior contato desses com o solo (Figura 3 B). Quando aplicado na linha, o maior valor de Pi-Lábil foi obtido com o ST (Figura 3 B), não diferindo entre as formas de aplicação (Figura 3 B). Em relação à área sem adubação, as fontes de MAP, SS aplicadas a lanço e ST aplicado a lanço e na linha obtiveram os maiores valores do Pi-Lábil (Figura 3 B).

Para o Pi-NLábil, a adubação fosfatada, independente da fonte e da forma de aplicação, proporcionou maior incremento dessa fração em relação ao controle (Figura 3 C). A transformação do Pi-Lábil para o Pi-NLábil ocorreu e foram equivalentes entre as fontes na safra 2016/2017. Já para a precipitação do P com o cálcio ocorreu em maior intensidade nas áreas do tratamento controle e com a aplicação do MAP, os quais diferiram dos valores obtidos com a aplicação dos demais tratamentos (Figura 3 D). O P-occluso teve os maiores valores nas áreas com a aplicação do SS, diferindo das demais fontes e do controle (Figura 3 E).



**Figura 3.** Frações de fósforo (P) inorgânica em solução (Pi-sol) (mg dm<sup>-3</sup>) (A), Lábil (Pi-Lábil) (mg dm<sup>-3</sup>) (B), pouco a moderadamente Lábil (Pi-NLábil) (mg dm<sup>-3</sup>) (C), precipitado com Ca (Pi-Ca) (mg dm<sup>-3</sup>) (D) e ocluso (P-ocluso) (E) e P orgânico microbiano (Po-mic) (mg dm<sup>-3</sup>) (F), Lábil (Po-Lábil) (mg dm<sup>-3</sup>) (G) e moderadamente a pouco lábil (Po-NLábil) (H) em Latossolo Vermelho Distrófico em função de fontes fosfatadas (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e das formas de aplicação (Lanço e Linha) após a safra da soja 2016/2017. Letras maiúsculas distinguem as Fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação, ou independente da forma de aplicação; e as letras minúsculas distinguem as formas de aplicação entre si, dentro de cada fonte, ou independente da fonte. \*\*, \* e <sup>ns</sup> Variação significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.

As frações Po-mic, Po-Lábil e Po-NLábil correspondem juntas à fração de Po-total no solo (GATIBONI et al., 2013). O Po-mic variou com as formas de aplicação e a interação entre as formas de aplicação e as fontes (Tabela 2). Com a aplicação dos fertilizantes a lanço os maiores valores do Po-mic foram obtidos com a aplicação do MAP (Figura 3 F). Quando os fertilizantes foram aplicados na linha de plantio os maiores valores do Po-mic foram obtidos com a aplicação do FR, que não diferiu quando essa fonte foi aplicada a lanço (Figura 3 F).

O Po-Lábil alterou em função das fontes de variação (Tabela 2). Com a aplicação do SS a lanço e do ST a lanço e na linha obtiveram os maiores valores do Po-Lábil (Figura 3 G). Com a aplicação do FR, MAP e SS na linha obtiveram os menores valores do Po-Lábil todavia, não diferindo dos valores obtidos no tratamento Controle (Figura 3 G).

A Fração orgânica do P de menor labilidade (Po-NLábil) alterou somente em função das fontes (Tabela 2). Para o Po-NLábil, o MAP independe da forma de aplicação obteve o menor valor, não diferindo do tratamento Controle (Figura 3 H).

Na safra 2016/2017, a aplicação do ST proporcionou a manutenção de altas concentrações do Pi-Lábil, independente se aplicado a lanço ou na linha (Figura 3 B). Nas frações menos lábeis que alteraram com as fontes, Pi-Ca e Pi-ocluso, observa-se que com a aplicação do ST, foram obtidos os menores valores (Figuras 3 D e E, respectivamente). Assim, pode se afirmar que com a aplicação do ST, o residual após a colheita da safra, manteve-se na fração inorgânica lábil (Pi-Lábil) com menores perdas por precipitação com Ca (Pi-Ca) e por adsorção específica, em que o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  passa a fazer parte da estrutura cristalina do mineral (Pi-ocluso). Mesmo com alta produtividade da safra 2016/2017 com a aplicação do ST, e conseqüentemente alta exportação de P (Capítulo 1, Figuras 2 D e F, respectivamente), ainda houve altos valores residuais na fração Lábil inorgânica e orgânica, e menores perdas como precipitação com Ca e, ou, adsorção específica.

### **3.2. Frações do fósforo após a safra 2017/2018**

O P-total e o Pi-total do solo na safra 2017/2018 alteram em função das formas de aplicação e da interação entre as fontes e as formas de aplicação (Tabela 3). O Po-total, variou somente entre as formas de aplicação (Tabela 3).

Com a aplicação dos fertilizantes fosfatados a lanço foram obtidos os maiores valores de P-total, Po-total e Pi-total, com exceção do MAP, e o P-total e Pi-total não

diferiram com as formas de aplicação (Figura 4). Somente com a aplicação a lanço de todos os fertilizantes foram obtidos valores de P-total e Po-total superiores ao controle (Figura 4). Para o Pi-total, a aplicação a lanço de todos os fertilizantes fosfatados e do MAP na linha, obtiveram valores superiores ao controle (Figura 4).

Todas as subfrações de Pi no solo variaram em função da interação entre as fontes de P utilizadas e as formas de aplicação (Tabela 3). O mesmo resultado foi obtido para as subfrações de Po no solo, com exceção para o Po-mic que variou em função das fontes utilizadas e das formas de aplicação, sem interação entre essas (Tabela 3).

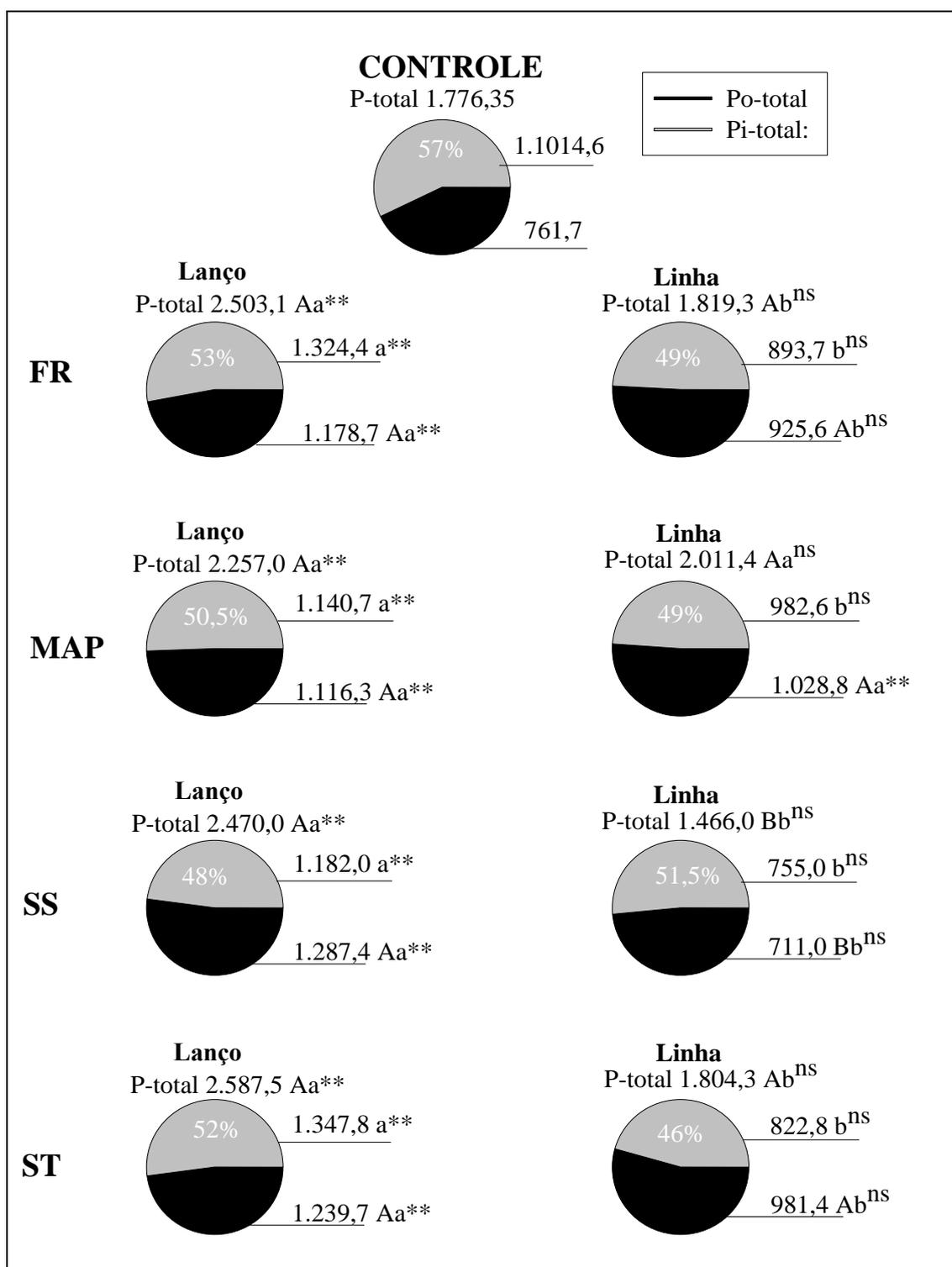
**Tabela 3.** Resumo da ANOVA (Fcalculado) das variáveis avaliadas na Safra 2017/2018.

Fontes de Variação	Bloco	Fonte(F)	Forma de Aplicação(FA)	F*FA	F*FA vs. Controle	CV(%)	$\bar{x}$
<b>P-total<sup>1</sup></b>	2,28 <sup>2</sup>	1,62 <sup>ns</sup>	73,00 <sup>**</sup>	4,01 <sup>*</sup>	8,06 <sup>**</sup>	0,07	2.077,20
<b>Po-total</b>	1,74 <sup>ns</sup>	1,52 <sup>ns</sup>	59,70 <sup>**</sup>	2,51 <sup>ns</sup>	0,31 <sup>ns</sup>	0,19	1.051,58
<b>Pi-total</b>	3,13 <sup>**</sup>	1,22 <sup>ns</sup>	48,96 <sup>**</sup>	5,92 <sup>**</sup>	22,22 <sup>**</sup>	0,20	1.025,62
<b>Pi-sol</b>	0,04 <sup>ns</sup>	6,61 <sup>**</sup>	35,97 <sup>**</sup>	4,84 <sup>**</sup>	5,53 <sup>**</sup>	10,81	18,50
<b>Pi-Lábil</b>	1,12 <sup>ns</sup>	2,79 <sup>*</sup>	30,28 <sup>**</sup>	7,86 <sup>**</sup>	6,20 <sup>*</sup>	5,47	25,84
<b>Pi-NLábil</b>	1,55 <sup>ns</sup>	4,40 <sup>**</sup>	22,91 <sup>**</sup>	3,22 <sup>*</sup>	13,65 <sup>**</sup>	0,27	530,60
<b>Pi-Ca</b>	0,58 <sup>ns</sup>	8,49 <sup>**</sup>	8,48 <sup>**</sup>	6,38 <sup>**</sup>	0,94 <sup>ns</sup>	4,03	65,70
<b>Pi-ocluso</b>	1,34 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	12,87 <sup>**</sup>	4,40 <sup>**</sup>	6,51 <sup>*</sup>	0,52	384,98
<b>Po-mic</b>	0,44 <sup>ns</sup>	4,10 <sup>*</sup>	65,24 <sup>**</sup>	1,11 <sup>ns</sup>	6,92 <sup>**</sup>	2,35	104,33
<b>Po-Lábil</b>	8,64 <sup>**</sup>	9,95 <sup>**</sup>	23,74 <sup>**</sup>	13,95 <sup>**</sup>	1,09 <sup>ns</sup>	3,93	56,84
<b>Po-NLábil</b>	2,75 <sup>*</sup>	2,37 <sup>ns</sup>	33,80 <sup>**</sup>	5,06 <sup>**</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	0,19	890,40

<sup>1</sup>Fósforo total (P-total); fósforo orgânico total (Po-total); fósforo inorgânico total (Pi-total); fósforo inorgânico na solução do solo (Pi-sol); fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil); fósforo inorgânico moderadamente ou pouco lábil (Pi-NLábil); fósforo inorgânico precipitado com cálcio (Pi-Ca); fósforo inorgânico ocluso (Pi-ocluso); fósforo orgânico microbiano (Po-mic); fósforo orgânico lábil (Po-Lábil) e fósforo orgânico moderadamente ou pouco lábil (Po-NLábil).

<sup>2</sup>\*\* e <sup>ns</sup> Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.

O Pi-sol foi maior quando aplicado o FR a lanço, seguido das áreas com aplicação do SS e do ST, também, a lanço, os quais foram os únicos tratamentos a diferirem do controle (Figura 5 A). Todavia, os valores de Pi-sol não encontram correspondência com a fração do Pi-Lábil, que teoricamente é o fator Quantidade de P no solo, em que os maiores valores, também foram obtidos com a aplicação a lanço, mas com o SS seguido do MAP (Figura 5 B). Esse resultado sugere que outras frações de P do solo tamponam o Pi-sol.



**Figura 4.** Efeito das fontes (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e formas de aplicação (a lanço e na linha) sobre os teores de fósforo total (P-total) e das frações de fósforo inorgânico total (Pi-total) e fósforo orgânico total (Po-total) em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVD) após a colheita da safra 2017/2018. Letras maiúsculas distinguem as fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação, ou independente da forma de aplicação; e as letras minúsculas distinguem as formas de aplicação entre si, dentro de cada fonte, ou independente da fonte. \*\*, \* e <sup>ns</sup> Variação significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

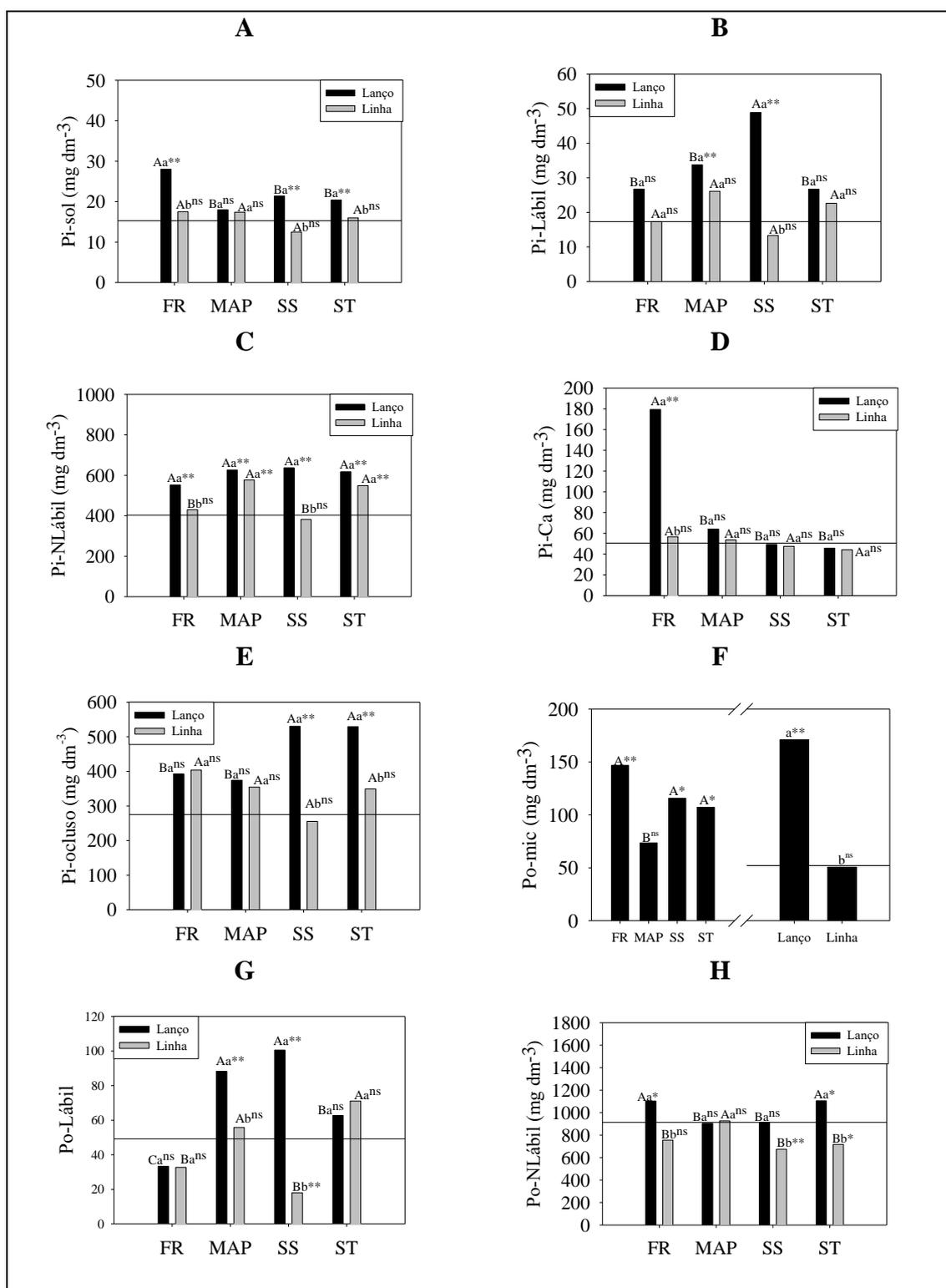
A fração de P moderadamente a pouco lábil (P-NLábil) não alterou entre as fontes quando aplicadas a lanço, mas foram superiores ao controle (Figura 5 C). Quando aplicado na linha, somente com as fontes MAP e ST os valores de P-NLábil foram superiores ao controle (Figura 5 C).

O Pi-Ca foi maior com a aplicação do FR a lanço (Figura 5 D). O aumento do Pi-Ca obtido com a aplicação do MAP na safra 2016/2017, também pode ser observado na safra 2017/2018, que com aplicação do MAP foram obtidos valores de 10 a 20 mg dm<sup>-3</sup> superiores em relação a aplicação do SS e do ST. Todavia, essa variação na safra 2017/2018 não foi suficiente para diferir estatisticamente os tratamentos com a aplicação do MAP dos que receberam a adubação com o SS e o ST, em função dos altos valores de P-Ca obtidos com a aplicação do FR a lanço.

O Pi-ocluso, foi superior nas áreas com a aplicação do SS e do ST a lanço (Figura 5 E). Os resultados nas safras 2016/2017 com a aplicação do SS são semelhantes. Já em relação ao ST aplicado a lanço houve incremento dessa fração, que representa perda da eficiência do fertilizante residual quando o H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> passa a fazer parte da estrutura cristalina dos minerais.

Já nas frações orgânicas, somente com a aplicação do MAP obteve-se os menores valores de Po-mic, não diferindo do controle, e quando aplicado os fertilizantes na linha (Figura 5 F). O Po-Lábil obteve os maiores valores com aplicação de MAP e SS aplicados a lanço (Figura 5 G). O Po-NLábil, as fontes que contribuíram para o aumento dessa fração foi o FR e ST aplicados a lanço (Figura 5 H).

Após a safra 2017/2018, com a aplicação dos fertilizantes a lanço há maior disponibilização do P em solução (Figura 5 A), resultado do maior contato do fertilizante com o solo. Exceção é encontrada quando aplicado o MAP, que não diferiu entre as formas de aplicação, obtendo valores semelhantes as áreas com uso do SS e do ST a lanço (Figura 5 A). A igualdade do Pi-sol quando aplicado o MAP a lanço e na linha pode ser explicada pela alta velocidade de solubilização desse fertilizante, que conforme Nascimento et al. (2018) com o uso do MAP foi observado aumento da mobilidade do P no solo, quando comparado com o ST. Com o aumento do Pi-sol com a aplicação a lanço dos fertilizantes, observa-se maior transformação do Pi-sol para as frações inorgânicas lábeis (Pi-Lábil) e de moderada a pouca labilidade (Pi-NLábil) (Figuras 5 B e C, respectivamente).



**Figura 5.** Frações de fósforo (P) inorgânica em solução (Pi-sol) (mg dm<sup>-3</sup>) (A), Lábil (Pi-Lábil) (mg dm<sup>-3</sup>) (B), pouco a moderadamente Lábil (Pi-NLábil) (mg dm<sup>-3</sup>) (C), precipitado com Ca (Pi-Ca) (mg dm<sup>-3</sup>) (D) e ocluso (P-ocluo) (E) e P orgânico microbiano (Po-mic) (mg dm<sup>-3</sup>) (F), Lábil (Po-Lábil) (mg dm<sup>-3</sup>) (G) e moderadamente a pouco lábil (Po-NLábil) (H) em um Latossolo Vermelho Distrófico em função de fontes de fertilizantes fosfatos (Fosfato Reativo – FR, Monoamônio fosfato – MAP, Superfosfato Simples – SS e Superfosfato Triplo – ST) e de suas formas de aplicação (Lanço e Linha) após a safra de soja 2017/2018. Letras maiúsculas distinguem as Fontes entre si, dentro de cada forma de aplicação ou independente da forma de aplicação; e as letras minúsculas distinguem as formas de aplicação entre si, dentro de cada fonte, ou independente da fonte. \*\*, \* e ns Variação significativa entre os tratamentos e o controle a 1 e 5% e não significativo, respectivamente.

Os teores de P precipitado com o Ca na safra 2017/2018 (Pi-Ca) (Figura 5 D) apresentaram valores próximos e comportamento semelhante aos obtidos na safra 2016/2017 (Figura 3 D), com exceção do FR aplicado a lanço, que na safra 2017/2018 obteve valores superiores. Ou seja, houve pouca perda de P precipitado com Ca na safra 2017/2018, e os altos valores obtidos com o FR é em função da sua composição, que é de fosforita (Fosfato Reativo de Marrocos). Já, o P perdido, possivelmente por adsorção específica ou precipitação na forma de fosfatos tricálcicos, foi maior quando aplicado o SS e o ST a lanço. A aplicação dos fertilizantes a lanço proporcionou maior disponibilidade de P, mas também, aumentam as perdas. O Pi-ocluso na área com o uso do SS obteve valores semelhantes entre as safras 2016/2017 (Figura 3 E) e 2017/2018 (Figura 5 E) com valores próximos a  $500 \text{ mg dm}^{-3}$ .

A principal diferença do Pi-ocluso entre as safras, está no aumento dos valores obtidos com a aplicação do ST a lanço, com incremento de mais de  $100 \text{ mg dm}^{-3}$ . Como na safra 2017/2018 a exportação de P ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) (média de  $127 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para as áreas com adubação fosfatada) (Capítulo 1, Figura 4 E) foi superior a dose aplicada ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), há possibilidade da perda do P da fração lábil residual da safra 2016/2017 oriundo do ST, ter se transformado em Pi-ocluso após a safra 2017/2018. Como houve correlação positiva entre o Pi-ocluso e o P disponível obtido pelo extrator Mehlich I na safra 2017/2018 (Tabela 4), há possibilidade de parte do Pi-ocluso ser constituído por fosfatos bi e tricálcicos, como relatado por Gatiboni et al (2013).

**Tabela 4.** Coeficientes de correlação entre as Frações de P no solo e variáveis de teor de P no solo extraído por Mehlich I (P-MI) ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), balanço de P ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), eficiência de uso das fontes ( $\text{kg kg}^{-1}$  de grãos), teor de P no estádio R1(P(R1)) ( $\text{g kg}^{-1}$  de P), restos culturais (RC) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), P nos restos culturais (PRC) ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e exportação de P ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) nas safras 2016/2017 e 2017/2018.

	Produtividade	P-MI	Balanço	EU	P(R1)	RC	PRC	Exportação
<b>Safra 2016/2017</b>								
Pi-sol <sup>1</sup>	-0,09 <sup>ns2</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	-0,06 <sup>ns</sup>
Pi-Lábil	0,15 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	<b>0,31**</b>	-0,05 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>
Pi-NLábil	0,04 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	<b>0,34**</b>	0,01 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>
Pi-Ca	<b>-0,23*</b>	0,04 <sup>ns</sup>	-0,08 <sup>ns</sup>	-0,20 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	-0,18 <sup>ns</sup>
Pi-ocluso	0,13 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
Po-mic	0,03 <sup>ns</sup>	<b>0,27*</b>	0,16 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	-0,06 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>
Po-Lábil	0,18 <sup>ns</sup>	-0,10 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>	<b>0,23*</b>	-0,11 <sup>ns</sup>	0,00 <sup>ns</sup>	<b>0,24*</b>
Po-NLábil	0,09 <sup>ns</sup>	0,14 <sup>ns</sup>	<b>0,26*</b>	0,06 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	-0,05 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>
<b>Safra 2017/2018</b>								
Pi-sol	0,02 <sup>ns</sup>	<b>0,29*</b>	0,19 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>	-0,15 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,07 <sup>ns</sup>
Pi-Lábil	0,07 <sup>ns</sup>	<b>0,29*</b>	0,13 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	<b>-0,27*</b>	0,19 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>
Pi-NLábil	<b>0,24*</b>	0,28 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	0,20 <sup>ns</sup>	<b>-0,31**</b>	<b>0,30**</b>	<b>0,28*</b>	<b>0,25*</b>
Pi-Ca	-0,14 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	-0,17 <sup>ns</sup>	0,01 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>	-0,05 <sup>ns</sup>
Pi-ocluso	0,13 <sup>ns</sup>	<b>0,37**</b>	0,21 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>	-0,03 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
Po-mic	0,02 <sup>ns</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	-0,09 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,1 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>
Po-Lábil	0,06 <sup>ns</sup>	<b>0,25*</b>	-0,04 <sup>ns</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	-0,21 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	-0,04 <sup>ns</sup>	0,09 <sup>ns</sup>
Po-NLábil	-0,02 <sup>ns</sup>	0,21 <sup>ns</sup>	-0,07 <sup>ns</sup>	-0,02 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	-0,11 <sup>ns</sup>	0,05 <sup>ns</sup>	0,08 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup>Fósforo total (P-total); fósforo orgânico total (Po-total); fósforo inorgânico total (Pi-total); fósforo inorgânico na solução do solo (Pi-sol); fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil); fósforo inorgânico moderadamente ou pouco lábil (Pi-NLábil); fósforo inorgânico precipitado com cálcio (Pi-Ca); fósforo inorgânico ocluso (Pi-ocluso); fósforo orgânico microbiano (Po-mic); fósforo orgânico lábil (Po-Lábil) e fósforo orgânico moderadamente ou pouco lábil (Po-NLábil).

<sup>2</sup>\*\* e <sup>ns</sup> Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.

A aplicação das fontes solúveis (MAP, SS e ST) na safra 2017/2018 aumentou a produtividade de grãos da soja (Figura 4 D). A forma de aplicação não alterou a produtividade da soja, todavia, o maior contato do fertilizante com o solo quando da aplicação a lanço aumentou os teores residual do Pi-Lábil e as perdas de P para formas menos lábeis inorgânicas (Pi-ocluso) e orgânica (Po-NLábil), principalmente com o uso do ST.

A principal diferença entre as duas safras, foi a reduzida eficiência quando utilizado o MAP, nas condições da safra 2016/2017, com redução da disponibilidade hídrica na primeira metade do ciclo de desenvolvimento da soja. Mas, quando há maior disponibilidade hídrica nas fases iniciais da soja, o MAP apresentou eficiência semelhante ao SS e ST sobre a produtividade de grãos da soja, e reduzida as perdas, transformação, do P lábil para frações de menor labilidade.

## 4. DISCUSSÃO

A eficiência do uso do fósforo (P) aplicado ao solo tem reduzido nas últimas décadas, e mais de 70% do P que é aplicado fica no solo, formando uma reserva de P, o qual é chamado de “P Legacy” (PAVINATO et al., 2020). Em tradução técnica seria todo o P residual somado de todas as safras que não foi absorvido pelas plantas.

Este trabalho é um dos retratos dessa afirmação, pois há saldo positivo do Balanço do P ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), com legado de 10 a  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nas safras 2016/2017 e 2017/2018 (Capítulo 1, Figura 6 F). E tem uma correlação negativa entre o balanço e a eficiência dos fertilizantes indicando que quanto maior o balanço menor a eficiência de uso, podendo levar a perdas do P residual no solo. Essa variação do balanço ocorreu em função da fonte de P utilizada. Assim, é importante estudos de fontes e novas tecnologias com o objetivo de aumentar a eficiência de uso do P aplicado, com consequente aumento do tempo de vida das reservas de minérios, mantendo o equilíbrio entre oferta e demanda dos fertilizantes fosfatados e consequente equilíbrio na oferta e demanda de alimentos, ou seja, a manutenção da segurança alimentar.

Mais importante que estimar o P Lábil residual do solo, é entender como esse fósforo se comporta no solo. O P no solo quando aplicado via fertilizante é solubilizado e libera o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução. O processo de solubilização e a disponibilização do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  no solo depende de fatores intrínsecos da fonte, do tipo solo e da interação entre esses.

Quando aplicado o MAP, na solução do solo há a dissociação e liberação dos pares iônicos  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução. Já quando aplicado o SS e o ST, o processo de solubilização dependerá do pH e dos drenos Ca e P, principalmente do solo. O ST é composto pelo fosfato monocálcico ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e o SS por fosfato monocálcico e uma porção por fosfato bicálcico e tricálcico que não são solúveis em água (MALAVOLTA, 1981; REETZ, 2017).

Como as frações de P foram avaliadas após a colheita das safras, aproximadamente de 120 a 140 dias após a aplicação (safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente) os valores de Pi-sol pouco diferiram entre as fontes, pois há redução dos teores de P solúvel no solo após o cultivo das plantas (OLIBONE e ROSOLEM, 2010), principalmente na camada de 0 a 0,1 m de camada, a qual é mais influenciada pela adubação fosfatada. Em outros trabalhos avaliando o Pi-sol, obtido por extração com resina trocadora de ânions, foi observado incrementos em função da adubação fosfatada (FRAZÃO et al., 2019).

Todavia, esses experimentos foram avaliados 45 dias após a aplicação dos fertilizantes. Os menores teores de Pi-sol após o cultivo das plantas podem ser atribuídos a absorção desses pelas plantas, lembrando que a concentração do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  na solução do solo é insuficiente para atender a demanda da planta, sendo necessário a manutenção da concentração no  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução pelas demais frações do P do solo, principalmente pela fração P-Lábil, orgânica e inorgânica.

Outro processo que leva a redução do Pi-sol é sua transformação em P-Lábil, que pode ocorrer em horas ou dias (NOVAIS e SMYTH, 1999). Em trabalhos de longa duração com a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados em solos com capacidade máxima de adsorção (CMAP) entre 0,8 a 1  $\text{mg g}^{-1}$ , os maiores incrementos foram obtidos na fração de P extraído com o NaOH (YAN et al., 2017), e equivale as frações de moderada a pouca labilidade (Pi-NLábil) do presente trabalho.

Yan et al. (2017), ainda relatam que o maior incremento de P na fração moderadamente e pouco lábil pode ser atribuída a presença de óxidos de Fe amorfos, que possuem alta capacidade de adsorção do P em solução. Em Cambissolos Húmicos de regiões de altitude subtropical, florestas de Araucárias, as principais frações de P que variaram entre os sistemas de uso do solo foram o Pi-Lábil, o Pi-NLábil e o Po-Lábil, sendo essa última fração obtida em maiores quantidade sob área de florestas nativas, e é resultado dos fatores de formação do solo (OLIVEIRA et al., 2015).

Destaca-se, ainda, que após a safra 2016/2017 na área com aplicação do SS obtiveram os menores valores de Pi-sol (Figura 4 A), podendo estar associado a fração de fosfato bi e tricálcico dessa fonte (MALAVOLTA, 1981; REETZ, 2017), que são solubilizados mais lentamente, em relação ao MAP. A maior velocidade da solubilização do MAP, comparado com o ST pode ser atribuído aos altos teores de Ca nesse solo (Capítulo 1, Tabela 2), reduzindo o processo de solubilização desse fertilizante, semelhante ao relatado por Diatta et al. (2018). Os autores ainda relatam que a solubilização do SS é ainda mais lenta, mantendo no solo condições termodinâmicas que mantêm a estabilidade de fosfatos de cálcio de menor solubilidade (DIATTA et al., 2018).

Já, na safra 2017/2018 observou-se maior residual de Pi-sol com a aplicação do FR a lanço. A aplicação do FR a lanço permite maior contato do fertilizante com o solo, e para as condições de solo do experimento, seria a forma recomendada, pois essa fonte possui baixa solubilidade, e depende da acidez do solo e do maior contato e tempo de contato para a liberação o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução (NOVAIS e SMYTH, 1999). O uso dessas fontes em culturas que acidificam a rizosfera teoricamente poderia apresentar a mesma

eficiência agronômica que fontes de P aciduladas, o que não foi observado no presente trabalho até a safra 2016/2017. Observa-se que não houve redução do pH do solo da safra 2016/2017 para a safra 2017/2018, e os altos valores de Ca no solo (Capítulo 1, Tabela 2) podem ter contribuído para a menor velocidade de solubilização e consequente liberação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução pelo FR. Assim, os maiores valores residuais de Pi-sol com a aplicação do FR na safra 2017/2018 pode estar associado a dois fatores isolados, ou em conjunto sendo: o baixo desenvolvimento das plantas nesse tratamento resultando em baixa exportação de P ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) (Capítulo 1, Figura 2 E) e o efeito residual somado de aplicação em quatro safras consecutivas, com alto saldo no balanço de P (Capítulo 1, Figura 6 F).

Na safrinha 2016, após a segunda safra da soja (2015/2016), a eficiência do FR foi baixa, comparado ao SS e ao ST (BARBOSA et al., 2017). Rodrigues et al. (2009) e Ramos et al. (2010) relatam maior eficiência de fosfatos reativos em safra subsequente quando cultivado em solo com alto dreno de Ca, sendo uma estratégia a aplicação antecipada desse fertilizante em cultivo de forrageiras antes da safra e em solos com alto dreno de Ca, favorecendo a solubilização do FR. Outra estratégia para aumentar a eficiência dos FR e a aplicação conjunta com fertilizantes nitrogenados, como o sulfato de amônio, devido a acidificação proporcionada pela nitrificação do amônio (CABRAL et al., 2020), ou mesmo a formulação de fertilizantes granulado com o FR e enxofre elementar (CÉSAR et al., 2020). Outras tecnologias vêm sendo desenvolvidas para aumentar a eficiência de fontes de fósforo de menor solubilidade, ou mesmo, para aumentar a eficiência de uso do legado do P de menor labilidade do solo, como uso de inoculantes com microrganismos solubilizadores de fosfato (ALAYLAR et al., 2020).

Após a solubilização dos fertilizantes, o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  reage com outros íons, e dependerá do pH e da concentração e atividade de todos os íons, com consequente precipitação com Fe e Al em pH ácido e com Ca em pH alcalino (NOVAIS e SMYTH, 1999; PENN e CAMBERATO, 2019), ou pode se transformar em Pi-Lábil em poucas horas e, ou, dias (NOVAIS e SMYTH, 1999). Em geral, a maior transformação do Pi-sol em Pi-Lábil na safra 2016/2017 foi com a aplicação dos fertilizantes solúveis a lanço, sendo que com o ST não houve diferença entre as formas de aplicação (Figura 2 B). Na safra 2017/2018, também, foi com a aplicação, principalmente do SS, a lanço (Figura 5 B). A maior transformação do Pi-sol para Pi-Lábil quando aplicado os fertilizantes a lanço ocorre em função do maior contato das fontes com as partículas do solo.

Todavia, com o tempo, o Pi-Lábil pode se transformar em Pi-NLábil, através do processo de “envelhecimento” da interação do P com a superfície dos minerais do solo. Esse processo de envelhecimento pode ser resumido pela troca de ligantes da  $\text{OH}^-$  pelo  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com a superfície do mineral. A perda da OH entre o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e a superfície do mineral, também é chamada de desidratação, considerando que na maioria das interações eletrostáticas entre a superfície do coloide e o  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  a  $\text{OH}^-$  está protonada ( $\text{OH}^+$ ). Ocorre, também nesse processo, a formação de ligações bidentadas, que aumenta mais a energia de ligação do coloide como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , que dessa forma, passa a fazer parte da estrutura cristalina do mineral (NOVAIS e SMYTH, 1999).

A fração Pi-NLábil, representa a maior fração de Pi no solo variando de 24,3 a 25,5% do P total do solo. E com o tempo de cultivo, observa-se que os maiores incrementos brutos foram da fração Pi-NLábil com a adubação fosfatada, que obtinha valores médios de 70,5 a 327,0  $\text{mg dm}^{-3}$  após as safras 2014/2015 e 2015/2016, respectivamente (COUTO, 2018) e 441,3 e 546,5  $\text{mg dm}^{-3}$  após a safra 2016/2017 e 2017/2018 (Figuras 3 C e 5 C, respectivamente). O incremento do Pi-NLábil com o tempo, permite afirmar que o excesso de P aplicado via fertilizante pode reduzir sua labilidade, se não absorvido pelas plantas. Fato esse confirmado pela correlação positiva do balanço de P na safra 2016/2017, em que houve menor exportação de P ( $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) em relação a dose aplicada ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) com as frações inorgânicas e orgânica de P de moderada a pouca labilidade (Pi e Po-NLábil) (Tabela 4). O incremento do Pi e Po-NLábil pode ocorrer em maior quantidade quando aplicado fontes de P inorgânicas solúveis (YAN et al., 2017; FRAZÃO et al., 2019) ou mesmo em áreas de vegetação nativa (OLIVEIRA et al., 2015).

As principais perdas se referem à adsorção as superfícies dos oxihidróxidos de Fe e Al, majoritariamente a superfície da goethita e hematita (OLIBONE e ROSOLEM, 2015), principalmente em solos com alta taxa de substituição isomórfica de Fe por Al na estrutura da goethita, o que aumenta a sua superfície específica, aumentando as perdas de P por adsorção específica na superfície desse mineral, como ocorre em solos ácidos (AINSWORTH, et al., 1985; SCHAEFER et al., 2008; KAMPF et al., 2012); e a precipitação com o Fe e Ca livre em solução (NASCIMENTO et al., 2018).

Nascimento et al. (2018) relataram que a principal prática utilizada para reduzir as perdas de P por adsorção e precipitação com Fe livre em solução é a adoção de sistemas de cultivo que aumenta os teores de matéria orgânica do solo, impedindo o contato direto do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com a superfície dos oxihidróxidos de Fe, e formação de complexos

organometálicos entre os componentes da matéria orgânica do solo e o Fe e Ca livres em solução. Os autores ainda relatam que em solos ricos em Fe, a aplicação do MAP com ácidos orgânicos aumentou os teores de P-Lábil próximo ao fertilizante em relação ao MAP aplicado isoladamente, justificado pela redução da precipitação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com o Fe, que foi quelatizado pelos ácidos orgânicos, e o mesmo ocorreu para solos com altos teores de Ca (NASCIMENTO et al., 2018).

Outro mecanismo de perda do P é com a precipitação com o Ca livre em solução. Na safra 2016/2017, em função da baixa eficiência de uso do P (Capítulo 1, Figura 6A e B), principalmente com a aplicação do MAP, possivelmente houve a precipitação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução com o  $\text{Ca}^{2+}$ , com consequente altos teores de Pi-Ca com a aplicação dessa fonte (Figura 3 D).

Em solos agricultáveis com altos teores de matéria orgânica, como os solos de várzea, a maior proporção do P no solo precipita-se com Ca (ARENBERG et al., 2020), e ainda há a possibilidade do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução formar complexos ternários monodentados com o  $\text{Ca}^{2+}$  e ácidos húmicos da MOS, (AUDETTE et al, 2020), o que pode levar a redução da mobilidade e disponibilidade na fração lábil. Zhang et al. (2020) também relatam que pode ocorrer a formação de frações de P ligados a compostos orgânicos do solo, pela acidificação do solo provocada pela adição de nitrogênio (N) ao ambiente, e com consequente alteração da dinâmica do P nos solos.

O processo de precipitação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com o  $\text{Ca}^{2+}$  em solução, também é chamado de remineralização. Esse processo ocorre em função da concentração e atividade dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução. O pH altera o composto resultante da precipitação, mas não impede que esse processo ocorra, visto que pode ocorrer tanto em condições de pH ácido, quanto em pH básico, e que é influenciado pela CTC do solo e sua capacidade de manter constante a concentração de Ca na solução (PENN e CAMBERATO, 2019).

No presente trabalho os maiores valores da fração do P-Ca após a safra 2016/2017 foram obtidos com a aplicação do MAP (Figura 3 D) e pode ser atribuído ao processo de remineralização. A disponibilização imediata do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução, quando da aplicação do MAP, pode ter favorecido o processo de remineralização do P, reduzindo a sua labilidade. Essa maior disponibilidade do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  em solução com a aplicação do MAP ocorre em função da menor absorção de P pelas plantas na safra 2016/2017 (Capítulo 1, Figuras 6 A e B), possivelmente pelo déficit hídrico que ocorreu na fase vegetativa de desenvolvimento das plantas.

Foltran et al. (2019) relatam que sob condições de estresse hídrico há redução da taxa de crescimento das plantas, com consequentemente aumento da P solúvel no solo. Os autores ainda relatam que com 12 meses após a adubação com os fertilizantes fosfatados (SS e FR) houve transformação do P lábil em P de moderada labilidade, mas que foi reversível, permitindo acesso das plantas a essa fração do P.

Algumas tecnologias são testadas com o objetivo de reduzir a solubilidade dos fertilizantes fosfatados, favorecendo a liberação lenta, e reduzindo, assim, as perdas com precipitação com o Ca. Todavia, o uso de ácidos húmicos como aditivos ao MAP, com a finalidade de complexar o Ca e reduzir a sua atividade em solução, não reduziu as perdas por precipitação do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com o  $\text{Ca}^{2+}$  (NASCIMENTO et al., 2018).

Na Tabela 4, observa-se que houve correlação negativa entre a produtividade da soja com os teores de Pi-Ca na safra 2016/2017. Então, a redução da produtividade da soja na safra 2016/2017 em parte, pode ser explicada pela precipitação do P com o Ca. Já as frações de menor labilidade (Pi-NLábil) podem contribuir para o tamponamento do Pi-sol, como observado pela correlação positiva entre essas frações em ambas as safras avaliadas (Tabela 5) e consequentemente para o aumento da produtividade, como observado pela correlação positiva da produtividade de grão na safra 2017/2018 com os teores de Pi-NLábil (Tabela 4), corroborando com os resultados de Foltran et al. (2019).

**Tabela 5.** Coeficientes de correlação entre as frações de P obtidos após a safra 2016/2017 e 2017/2018.

Safra 2016/2017								
	Pi-sol	Pi-Lábil	Pi-NLábil	Pi-Ca	Pi-ocluso	Po-mic	Po-Lábil	Po-Nlábil
Pi-sol <sup>1</sup>	1,00	0,12 <sup>ns2</sup>	<b>0,24*</b>	0,10 <sup>ns</sup>	-0,05 <sup>ns</sup>	0,13 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	<b>0,23*</b>
Pi-Lábil		1,00	<b>0,39**</b>	<b>-0,30**</b>	-0,19 <sup>ns</sup>	<b>0,23*</b>	<b>0,54**</b>	<b>0,38**</b>
Pi-Nlábil			1,00	<b>-0,29*</b>	0,09 <sup>ns</sup>	<b>0,28*</b>	<b>0,43**</b>	<b>0,78**</b>
Pi-Ca				1,00	<b>-0,34**</b>	-0,16 <sup>ns</sup>	<b>-0,53**</b>	<b>-0,46**</b>
Pi-ocluso					1,00	-0,08 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,18 <sup>ns</sup>
Po-mic						1,00	0,01 <sup>ns</sup>	<b>0,31**</b>
Po-Lábil							1,00	<b>0,44**</b>
Po-Nlábil								1,00
Safra 2017/2018								
	Pi-sol	Pi-Lábil	Pi-NLábil	Pi-Ca	Pi-ocluso	Po-mic	Po-Lábil	Po-Nlábil
Pi-sol	1,00	<b>0,42**</b>	<b>0,45**</b>	<b>0,67**</b>	<b>0,41**</b>	<b>0,50**</b>	0,12 <sup>ns</sup>	<b>0,56**</b>
Pi-Lábil		1,00	<b>0,81**</b>	0,15 <sup>ns</sup>	<b>0,30**</b>	<b>0,55**</b>	<b>0,63**</b>	<b>0,42**</b>
Pi-Nlábil			1,00	0,15 <sup>ns</sup>	0,20 <sup>ns</sup>	<b>0,36**</b>	<b>0,57**</b>	<b>0,56**</b>
Pi-Ca				1,00	0,14 <sup>ns</sup>	<b>0,43**</b>	-0,10 <sup>ns</sup>	0,16 <sup>ns</sup>
Pi-ocluso					1,00	<b>0,42**</b>	<b>0,43**</b>	0,22 <sup>ns</sup>
Po-mic						1,00	0,20 <sup>ns</sup>	<b>0,36**</b>
Po-Lábil							1,00	<b>0,31**</b>
Po-Nlábil								1,00

<sup>1</sup>Fósforo total (P-total); fósforo orgânico total (Po-total); fósforo inorgânico total (Pi-total); fósforo inorgânico na solução do solo (Pi-sol); fósforo inorgânico lábil (Pi-Lábil); fósforo inorgânico moderadamente ou pouco lábil (Pi-NLábil); fósforo inorgânico precipitado com cálcio (Pi-Ca); fósforo inorgânico ocluso (Pi-ocluso); fósforo orgânico microbiano (Po-mic); fósforo orgânico lábil (Po-Lábil) e fósforo orgânico moderadamente ou pouco lábil (Po-NLábil).

<sup>2</sup>\*\* e <sup>ns</sup> Significativo a 1 e 5% e não significativo, respectivamente pelo teste de F.

Todos os processos de transformação das frações de P inorgânico (Pi), podem sofrer alterações significativas em função da dinâmica da matéria orgânica do solo, que por sua vez varia em função do manejo adotado. No presente trabalho, fixou-se a alterar somente as fontes e formas de aplicação do P no solo. A relação entre o P disponível no solo e a fração orgânica apresenta comportamento semelhante com a do N, em que os processos de imobilização e mineralização vão depender da quantidade e qualidade da matéria orgânica, ou seja, da relação P:C. De maneira geral, mesmo em solos tropicais a participação do P orgânico no P total é superior ao P inorgânico. Na primeira safra, a fração Po representava em média, 60% do P total do solo (COUTO, 2018). Na safra 2016/2017 as áreas com a aplicação do MAP e do SS a fração orgânica já representava menos de 50% do P-total do solo. Todavia, essa redução se deve ao maior incremento da fração inorgânica do solo com os anos, pois, também houve incremento das frações de P

orgânico nos tratamentos. Esse maior incremento do Pi total se deve em muito ao excesso de P no solo, conforme já afirmado por Pavinato et al. (2020).

No fracionamento do P pela metodologia de Hedley (HEDLEY et al., 1982) as frações orgânicas são o P orgânico microbiano (Po-mic), a fração lábil (Po-Lábil) extraída com o bicarbonato de sódio, e as frações moderadamente a pouco lábil (Po-NLábil) extraídas com o NaOH 0,5 e 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>.

O Po-mic assume importante função por controlar os processos de imobilização e mineralização do P do solo. E seu conhecimento, mesmo em solos tropicais com alta variabilidade espacial e principalmente, temporal, ajuda a entender a intensidade dos processos de transformação do P entra as frações orgânicas e inorgânicas. O equilíbrio entre os processos de mineralização e imobilização do P no solo depende dos teores de P nos resíduos, sendo que com 0,2% de P há equilíbrio entre os processos, acima desse valor há predominância da mineralização e abaixo (<0,2%) há a predominância da imobilização do P no solo (NOVAIS e SMYTH, 1999). Em ambas as safras avaliadas os teores médios de P nos restos culturais foram abaixo de 0,2% (1,7 e 0,4 g kg<sup>-1</sup> após as safras 2016/2017 e 2017/2018, respectivamente). Assim, é possível afirmar, que há predomínio do processo de imobilização do P no solo para as condições do presente trabalho.

Em geral, nas duas safras foram obtidas alterações do Po-mic em função das fontes e da forma de aplicação. Os maiores teores de Po-mic, em geral, foram obtidos com a aplicação das fontes a lanço. O maior contato dos fertilizantes com o solo quando aplicados a lanço favorece maior contato do P com a microbiota. Assim, favorecer o processo de transformação do P no solo mediado pelos microrganismos. Os teores de Po-mic no solo não significa que aumentará o estoque de Po-Lábil do solo. Nas duas safras avaliadas só houve correlação significativa do Po-mic com a fração Po-NLábil (Tabela 5), indicando que esse processo pode levar a formação de P ligado a compostos orgânicos de maior recalcitrância no solo. A maior fração do Po no solo está associada a ortofosfato de monoésteres, podendo representar até 90% do Po sendo, forma orgânica de P mais estável. Assim, dificulta a mineralização do P, favorecendo o acúmulo no solo do Po-NLábil (NOVAIS e SMYTH, 1999, RHEINHEIMER et al., 2008). Em contra partida 23 e 21% da variação positiva do Pi-Lábil e do Pi-NLábil após a safra 2016/2017 é explicado pela variação do Po-mic no solo com correlação positiva. Na safra 2017/2018 o Po-mic só não obteve correlação positiva com o Po-Lábil, sugerindo que a microbiota participa ativamente da transformação do P no solo, inclusive tamponando o Pi-sol.

Na safra 2016/2017 com a aplicação do MAP a lanço foram obtidos os maiores valores de Po-mic. Esse resultado mostra que o P não absorvido pelas plantas quando da aplicação do MAP nessa safra, além de perdido por precipitação com Ca, parte foi imobilizado pela microbiota. Quando aplicado os fertilizantes na linha, os maiores valores foram obtidos nas áreas com a aplicação do FR (Figura 3 F).

Na safra 2017/2018, independente da forma de aplicação, os maiores teores do Po-mic foram obtidos com a aplicação do FR (Figura 5 F). Chama a atenção a não obtenção de P microbiano quando aplicado o MAP na linha, nas safras 2014/2015 e 2015/2016 (COUTO, 2018) e nas safras 2016/2017 (Figura 3 F) e 2017/2018 (dados não apresentados). A redução da atividade microbiana e, principalmente de microrganismos solubilizadores de fosfato com a aplicação do MAP é justificada pela alta velocidade de solubilização aumentando muito a concentração do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  na solução do solo (CAIONE et al., 2020). Os autores ainda relatam que a semente com a utilização do ST com composto orgânico proporcionou o maior crescimento das plantas e com efeitos positivos no aumento da atividade microbiana do solo e crescimento da cana-de-açúcar aos 100 dias após a aplicação, e que a aplicação de compostos orgânicos junto com a adubação fosfatada aumenta a disponibilidade do P para as plantas e reduz as perdas por adsorção.

Os maiores teores de Po-mic quando da aplicação do FR, na linha na safra 2016/2017, e na safra 2017/2018 (independente da forma de aplicação dos adubos), pode ser um indicativo, também, do aumento da atividade de microrganismos solubilizadores de fosfato. Todavia, mesmo com esse resultado, não foi possível a obtenção de altas produtividades na soja com a aplicação dessa fonte (Capítulo 1, Figuras 2 D e 4 D).

Havia a expectativa que com o tempo as áreas com a aplicação do FR obtivessem maiores produtividades da soja, em função do maior tempo de contato do fertilizante com o solo. Todavia, não foi obtido, o que pode estar associado aos altos teores de P orgânico no solo e o baixo fator dreno de Ca no solo.

O Po-Lábil, também, obteve os maiores valores quando da aplicação das fontes a lanço, aumentando o legado do P no solo em fração orgânica Lábil, o que é benéfico, se comparando as perdas para a fração Pi-NLábil. Com a aplicação do SS e ST (safra 2016/2017) e do MAP e SS, seguido do ST (safra 2017/2018) foram obtidos os maiores valores de Po-Lábil. Esse maior incremento do Po-Lábil no solo, possivelmente possa ser atribuído, tanto a atividade da microbiota, quanto ao P absorvido pelas raízes das plantas. Mesmo avaliando em superfície, não há indícios que o P da palhada residual das culturas e das plantas de cobertura influenciem essa fração, visto que não há correlação da

produtividade de palhada e de P na palhada com as frações orgânicas de P no solo em ambas as safras avaliadas (Tabela 4).

## 5. CONCLUSÃO

Com os dados obtidos é possível concluir que as frações de P no solo alteraram com as fontes e as formas de aplicação. A aplicação a lanço aumenta os teores das frações lábeis e de baixa labilidade de P inorgânico e orgânico no solo, principalmente quando aplicada as fontes de maior solubilidade como o MAP, SS e ST.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Agradecemos ao CNPq pelo financiamento do projeto e a parceria com a Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano (COMIGO), Ao IF Goiano pelo apoio financeiro na tradução e submissão do artigo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALA, D. B.; MOORE, P. A.; RODRIGUES, M.; HERRERA, W. F.; PAVINATO, P. S. Long-term effects of alum-treated litter, untreated litter and  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  application on phosphorus speciation, distribution and reactivity in soils using K-edge XANES and chemical fractionation. **Journal of Environmental Management**, v. 213, p. 206-216, 2018.

AINSWORTH, C.C.; SUMMER, M. E.; HURST, V. J. Effect of Aluminum Substitution in Goethite on Phosphorus Adsorption: I. Adsorption and Isotopic Exchange. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n.5, p. 1143-1149, 1985.

ALAYLAR, B.; EGAMBERDIEVA, D.; GULLUCE, M.; KARADAYI, M.; ARORA, N. K. Integration of molecular tools in microbial phosphate solubilization research in agriculture perspective. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 36, n. 93, p. 1-12, 2020.

ARENBERG, M. R.; LIANG, X.; ARAI, Y. Immobilization of agricultural phosphorus in temperate floodplain soil of Illinois, USA. **Biogeochemistry**, v. 150, p. 257-278, 2020.

AUDETTE, Y.; SMITH, D. S.; PARSONS, C. T.; CHEN, W.; REZANEZHAD, F.; CAPPELLEN, P. van. Phosphorus binding to soil organic matter via ternary complexes with calcium. **Chemosphere**, v. 260, p. 1-10, 2020.

BARBOSA, K. P.; RODRIGUES, C. R.; TRINDADE, P. R.; COUTO, R. L.; SILVA, R. S.; VANIN, Á.; MENEZES, C. C. E.; ABREU, T. P.; NASCIMENTO JÚNIOR, L. F.; CHAGAS, M. G. K.; RODRIGUES, T. M.; CAVALCANTE, T. J. Residue of Phosphorus Sources Broadcast and Applied on Rows in Forages during Off-Season Crops. **Journal of Agricultural Science**, v. 9, p. 45-57, 2017.

BEAUCHEMIN, S.; HESTERBERG, D.; CHOU, J.; BEAUCHEMIN, M.; SIMARD, R. R.; SAYERS, D. E. . Speciation of phosphorus in phosphorus-enriched agricultural soils

using X-ray absorption near-edge structure spectroscopy and chemical fractionation. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, p. 1809-1819, 2003.

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

CABRAL, C. E. A.; CABRAL, C. H. A.; SANTOS, A. R. M.; CARVALHO, K. S.; BONFIM-SILVA, E. M.; MOTTA, L. J. M.; MATTOS, J. S.; ALVES, J. S.; BAYS, A. P. Ammonium sulfate enhances the effectiveness of reactive natural phosphate for fertilizing tropical grasses. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 8, n. 2, p. 86-92, 2020.

CAIONE, G.; PRADO, R. M.; VASCONCELOS, R. L.; SOUZA-JUNIOR, J. P.; CAMPOS, C. N. S.; MODA, L. R.; GONZÁLEZ, L. C. Phosphorus Sources Combined with Doses of Organic Compost Increased the Population of Soil Microorganisms and P Level in the Soil and Plant and the Dry Matter of Sugarcane. **Sugar Tech**, 2020.

CANTARUTTI, R. B.; BARROS, N. F.; MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAEZ V, V. H.; BARROZ, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa-MG: SBCS, 2007. p. 769-850.

CÉSAR, F. R. C. F.; MURAOKA, T.; SILVA, R. C. da; SOUZA-FILHO, L. F.. The agronomic benefit of phosphate rock application with elemental sulfur depends on the reactivity and fertilizer placement. **Journal of Plant Nutrition**, v. 43, n. 18, p. 2773-2784, 2020.

CHEN, C. R.; CONDRON, L. M.; DAVIS, M. R.; SHERLOCK, R. R. Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. **Plant Soil**, v. 220, p. 151-163, 2000.

COUTO, R. L. **Fontes e formas de aplicação de fósforo sobre suas frações no solo e a produtividade da soja**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Instituto Federal Goiano, Rio Verde, 64 p. 2018.

DIATTA, J.; BOROWIAK, K.; SZCZEPANIAK, W. Evaluation of fertilizers solubility and phosphate release in slightly acidic arable soil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 8, p. 1131-1141, 2018.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solution contain labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, p. 82-85, 1977.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. 2018. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portuguese). R package version 1.2.0**. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>>. Acesso em: 16 de jun. de 2020.

FOLTRAN, E. C.; ROCHA, J. H. T.; BAZANI, J. H.; GONÇALVES, J. L. M.; RODRIGUES, M.; PAVINATO, O.; VALDUGA, G. R.; ERRO, J.; GARCIA-MINA, J. M. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. **Forest Ecology and Management**, v. 435, p. 170-179, 2019.

FRAZÃO, J. J. BENITES, V. M.; RIBEIRO, J. V. S.; PIEROBON, V. M.; LAVRES, J. Agronomic effectiveness of a granular poultry litter-derived organomineral phosphate fertilizer in tropical soils: Soil phosphorus fractionation and plant responses. **Geoderma**, v. 337, p. 582–593, 2019.

GALVANI, R.; HOTTA, L. F. K.; ROSOLEM, C. Phosphorus sources and fractions in an oxisol under no-tilled soybean. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 4, p. 15-421, 2008.

GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (Eds). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. v. 8, p. 141-187.

HEDLEY, M.J.; STEWARD, W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fraction induced by cultivation practices and laboratory incubation. **Soil Science Society of American Journal**, v. 46, p. 970-976, 1982.

KAMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. IN: KER, J.; CURO, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 343 p. 2012.

LOPES, A. S.; COX, F. R. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com a fixação de fósforo em solos sob cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, p. 82-88, 1979.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 594 p.

MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. **Catena**, v. 149, p. 385-393, 2017.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural waters. **Analytical Chimica Acta**, v. 27, p. 31-36, 1962.

NASCIMENTO, C. A. C.; PAGLIARI, P. H.; FARIA, L. A.; VITTI, G. C. Phosphorus mobility and behavior in soil treated with calcium, ammonium, and magnesium phosphates. **Soil Science Society of American Journal**, v. 28, n. 3, p. 622-631, 2018.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 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. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

OHLAND, T. **Fracionamento do fósforo e da matéria orgânica do solo em função de diferentes sistemas de cultivo e adubação.** Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus Marechal Cândido Rondon, 123 p. 2019.

OLIBONE, D.; ROSOLEM, C. A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, v. 67, p. 465-471, 2010.

OLIVEIRA, C. M. B.; ERICH, M. S.; GATIBONI, L. C.; OHNO, T. Phosphorus fractions and organic matter chemistry under different land use on Humic Cambisols in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 140-149, 2015.

PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

PENN, C. J.; CAMBERATO, J. J. A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. **Agriculture**, v. 9, n. 6, p. 1-18, 2019.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2020. **R: A Language and Environment for Statistical Computing.** Vienna, Áustria. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>. Acesso em: 16 de jun. 2020.

RAMOS, S. J.; FAQUIN, V.; RODRIGUES, C.R.; SILVA, C. A. Residual effect of p sources application in forage grasses on the successive cultivation of soybean. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 149-155, 2010.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente.** Tradução: Alfredo Scheid Lopes. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.

RHEINHEIMER, D.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, p. 576-586, 2008.

RODRIGUES, C. R.; FAQUIN, V.; ÁVILA, F. W.; RODRIGUES, T. M.; BALIZA, D. P.; OLIVEIRA, E. A. B. Crescimento e acúmulo de fósforo pela soja cultivada em sucessão a diferentes gramíneas forrageiras adubadas com super fosfato triplo e fosfato reativo de Arad. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1486-1494, 2009.

RODRIGUES, C. R.; FAQUIN, V.; ÁVILA, F. W. de; RODRIGUES, T. M.; BALIZA, D. P.; OLIVEIRA, E. A. B. Phosphorus fractions and soybean yield in succession to grasses fertilized with different phosphorus sources. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p. 1486-1494, 2009.

RODRIGUES, M.; PAVINATO, P. S.; WITHERS, P. J. A.; TELES, A. P. B.; HERRERA, W. F. B. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1050-1061, 2016.

ROSSET, J. S.; GUARESCHI, R. F.; PINTO, L. A. R. S.; PEREIRA, M. G.; LANA, M. C. Phosphorus fractions and correlation with soil attributes in a chronosequence of agricultural under no-tillage. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, p. 3915-3926, 2016.

SCHAEFER, C.; FABRIS, J.; KER, J. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review. **Clay Minerals**, v. 43, p. 137-154, 2008.

SILVA, F. C.; RAIJ, B.V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 267-288, 1999.

SILVA, J. V. S.; CRUZ, S. C. S.; ALOVISI, A. M. T.; KURIHARA, C. H.; XAVIER, W. D.; MARTINEZ, M. A. Adubação fosfatada no feijoeiro cultivado sob palhada de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Revista Ceres**, v. 65, p. 181-188, 2018.

SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; MAMO, T.; FRITZSCHE, F.; ZECH, W. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. **Geoderma**, v. 105, p. 21-48, 2002.

SOLTANGHEISI, A.; RODRIGUES, M.; COELHO, M. J. A.; GASPERINI, A. M.; SARTOR, L. R.; PAVINATO, P. S. Changes in soil phosphorus lability promoted by phosphate sources and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 179, p. 20-28, 2018.

SOLTANGHEISI, A.; SANTOS, V. R.; FRANCO, H. C. J.; KOLLN, O.; VITTI, A. C.; DIAS, C. T. S.; HERRERA, W. F. B.; RODRIGUES, M.; SOARES, T. M.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. Phosphate Sources and Filter Cake Amendment Affecting Sugarcane Yield and Soil Phosphorus Fractions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-17, 2019.

TIECHER, T.; SANTOS, D. R.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 271-281, 2012.

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

WARNES, G. R.; BOLKER, B.; BONEBAKKER, L. GENTLEMAN, R.; HUBER, W.; LIAW, A.; LUMLEY, T.; MAECHLER, M.; MAGNUSSON, A.; MOELLER, S.; SCHWARTZ, M.; VENABLES, B. 2020. **Gplots: Various R Programming Tools for Plotting Data. R package version 3.0.3.** Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=gplots>>. Acesso em: 16 de jun. 2020.

WARNES, G. R.; BOLKER, B.; LUMLEY, T.; JOHNSON, R. C. Contributions from JOHNSON, R. C. are Copyright SAIC-Frederick, Inc. Funded by the Intramural Research Program, of the NIH, National Cancer Institute and Center for Cancer Research under NCI Contract NO1-CO-12400. 2018. **Gmodels: Various R Programming Tools for Model Fitting. R package version 2.18.1.** Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=gmodels>>. Acesso em: 16 de jun. 2020

YAN, X.; WEI, Z.; HONG, Q.; LU, Z.; WU, J. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources. **Geoderma**, v. 259, p. 80-85. 2017.

ZHANG, H.; SHI, L.; FU, S. Effects of nitrogen deposition and increased precipitation on soil phosphorus dynamics in a temperate forest. **Geoderma**, v. 380, p. 1-10, 2020.

## 8. ANEXOS

### **ANEXO 1- Roteiro metodológico do fracionamento químico do fósforo no solo conforme Hedley et al. (1982) modificado por Chen et al. (2000).**

Foi utilizado cachimbo de 5 cm<sup>3</sup> de capacidade para retirada das amostras, as quais foram pesadas para determinação dos teores de P em miligramas por quilograma de solo e adicionadas em tubos tipo falcon com 50 mL de capacidade e identificados. Foram realizadas duas cachimbadas (as mesmas também foram pesadas), perfazendo duas amostras. Após a pesagem foi adicionado 30 mL do extrator NH<sub>4</sub>Cl 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> em todas as amostras (1 e 2) e posteriormente agitadas por 16 horas em agitador horizontal a 150 rpm. Em seguida as amostras foram centrifugadas a 3.000 *G-force* por 20 minutos, e separada a solução extratora do solo. Em seguida retirou alíquota de 15,8 mL do extrato para a determinação do P-NH<sub>4</sub>Cl. A determinação do P foi pelo método colorimétrico conforme descrito por Murphy e Riley (1962). O P extraído pelo NH<sub>4</sub>Cl 1 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> foi considerado o P inorgânico em solução (Pi-sol).

Em seguida, na amostra 1 obtidas anteriormente foi adicionado 30 mL de solução de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup> e na amostra 2 foi adicionado 30 mL de NaHCO<sub>3</sub> + 1 mL de CHCl<sub>3</sub> (99,5%) e agitadas por 16 horas em agitador horizontal a 150 rpm. Após as amostras foram centrifugadas a 3000 *G-force* rpm por 20 minutos e separada a solução extratora do solo. Em seguida, foi adicionado 30 mL de NaCl 0,5 mol L<sup>-1</sup> nos tubos com solo e novamente centrifugado a 3.000 *G-force* por 20 minutos para separação do solo e solução. As soluções obtidas da primeira e segunda centrifugações foram juntadas perfazendo o volume final de 60 mL. Foram retiradas 5 mL de ambas amostras (1 e 2) as quais correspondem aos extratos com NaHCO<sub>3</sub> e NaHCO<sub>3</sub>+CHCl<sub>3</sub>, colocados em tubos de ensaio de vidro, adicionado 0,5 g de persulfato de amônio e 1,5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1,8 mol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>), envolvidas em papel-alumínio e realizada a digestão em autoclave por 1 hora a 1 atm e 120°C. Após a digestão, esperou-se o resfriamento e logo foi adicionado 20 mL de água destilada em cada amostra. Em seguida foi realizada a determinação do P (MURPHY e RILEY, 1962) nas amostras em que corresponde ao P inorgânico mais orgânico extraído com NaHCO<sub>3</sub> (P<sub>total</sub>-NaHCO<sub>3</sub>) e ao P inorgânico mais orgânico e microbianos extraídos com NaHCO<sub>3</sub>+CHCl<sub>3</sub> (P<sub>total</sub>-NaHCO<sub>3</sub>+CHCl<sub>3</sub>). Assim, a diferença das determinações entre o P<sub>total</sub>-NaHCO<sub>3</sub>+CHCl<sub>3</sub> e o P<sub>total</sub>-NaHCO<sub>3</sub> resulta na obtenção do P orgânico microbiano (P-mic).

Foram retiradas alíquotas de 10 mL do extrato extraído com  $\text{NaHCO}_3$ , adicionado 3,5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1,8 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) e colocado na geladeira, a  $10^\circ\text{C}$ , por 2 horas para a precipitação da matéria orgânica. Em seguida as amostras foram centrifugadas por 10 min a 3.000 *G-force* e a solução separada para a determinação do P (MURPHY e RILEY, 1962) que corresponde ao P inorgânico (Pi). O  $\text{Pi-NaHCO}_3$  equivale ao P inorgânico lábil (Pi-Lábil). A diferença do  $\text{P}_{\text{total-NaHCO}_3}$  pelo  $\text{Pi-NaHCO}_3$  resultou na determinação do P orgânico lábil (Po-Lábil).

Após a leitura de P foram descartadas as alíquotas em que não se adicionou o clorofórmio e as demais extrações das frações de P foram realizadas somente na amostra 2 em que foi adicionado  $\text{NaHCO}_3+\text{CHCl}_3$  desde a primeira extração. Assim, adicionou-se 30 mL de  $\text{NaOH}$  ( $0,1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) nas amostras e estas foram agitadas por 16 horas em agitador horizontal a 150 rpm. Após as amostras foram centrifugadas a 3000 *G-force* rpm por 20 minutos e separada a solução extratora do solo. Em seguida adicionou mais 30 mL de  $\text{NaCl}$  ( $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) e centrifugou novamente por 10 min. O sobrenadante das duas centrifugações foi juntado para determinação do P e o solo foi reservado para a extração da próxima fração. Do extrato então obtido, retirou 5 mL colocados em tubos de ensaio de vidro, adicionou 0,5 g de persulfato de amônio e 1,5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1,8 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) envolvidas em papel-alumínio e realizada a digestão em autoclave por 1 hora a 1 atm e  $120^\circ\text{C}$ . Após a digestão, esperou-se o resfriamento e logo foi adicionado 20 mL de água destilada. Em seguida foi realizada a determinação do P (MURPHY e RILEY, 1962) para obtenção do P inorgânico mais orgânico extraído pelo  $\text{NaOH}$  ( $0,1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ). Ainda no extrato obtido das duas centrifugações anteriormente citadas, retirou-se 10 mL, adicionou 3,5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1,8 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) e colocado na geladeira, a  $10^\circ\text{C}$ , por 2 horas. Posteriormente, efetuou-se a centrifugação 3000 *G-force* rpm por 10 minutos, adicionados 6,5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1,8 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) (perfazendo volume final de 20 mL) e procedeu a determinação do P inorgânico moderadamente a pouco Lábil (Pi-NLábil) (MURPHY e RILEY, 1962).

Continuando a extração sequencial na amostra em que foi adicionado  $\text{NaHCO}_3+\text{CHCl}_3$ , foi adicionado  $\text{NaOH}$  ( $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ). As amostras foram agitadas por 16 horas em agitador horizontal a 150 rpm. Após as amostras foram centrifugadas a 3000 *G-force* por 20 minutos e separada a solução extratora do solo. Em seguida adicionou mais 30 mL de  $\text{NaCl}$  ( $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) e centrifugou novamente por 10 min. O sobrenadante das duas centrifugações foi juntado para determinação da parte do P moderadamente a pouco lábil e o solo foi reservado para a extração da próxima fração. Dessa extração foi retirado

5 mL colocados em tubos de ensaio de vidro, e adicionado 1,5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1,8 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) envolvidas em papel-alumínio para que ocorra a oxidação total do persulfato e realizada a digestão em autoclave por 1 hora a 1 atm e  $120^\circ\text{C}$ . Após a digestão, esperou-se o resfriamento e logo foi adicionado 20 mL de água destilada. Em seguida foi realizada a determinação do P (MURPHY e RILEY, 1962) para obtenção da parte do P inorgânico moderadamente a pouco lábil extraídos pelo NaOH ( $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ). Em seguida, retirou-se 10 mL do extrato obtido com as duas centrifugações inicialmente citadas, adicionou 3,5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1,8 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) e colocado na geladeira, a  $10^\circ\text{C}$  aproximadamente, por 2 horas. Posteriormente, efetuou-se a centrifugação 3000 *G-force* rpm por 10 minutos, adicionados 6,5 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $1,8 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) (perfazendo volume final de 20 mL) e procedeu a determinação de parte do P inorgânico moderadamente a pouco lábil (Pi-NaOH  $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) (MURPHY e RILEY, 1962).

A fração total de P inorgânico e de P orgânico moderadamente a pouco lábil (Pi-NLábil e Po-NLábil, respectivamente) foi estimada com a soma obtidas nas extrações com NaOH a  $0,1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$  e NaOH a  $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ .

Para obtenção do P precipitado com Ca, adicionou 30 mL de HCl ( $1 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ), agitou por 16 horas, centrifugou por 20 min a 3000 *G-force*, separou-se o sobrenadante e se adicionou nas amostras 30 mL de NaCl ( $0,5 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ), centrifugou-se novamente por 10 min. Juntou-se os dois extratos obtidos, retirando 40 mL para determinação do P (MURPHY e RILEY, 1962). Após essa extração, as amostras de solo contidas nos tubos do tipo falcon foram secas ao ar, pesadas 0,5 g de solo e colocadas em tubos de vidro para digestão para obtenção do P ocluso. Nas amostras pesadas foram adicionados 1 mL de  $\text{MgCl}_2$ , 2 mL de  $\text{H}_2\text{O}_2$  (30%) e 2 mL de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (98%) e levadas ao bloco para digestão a  $200^\circ\text{C}$  até que o solo fique seco. Após a digestão, retirou-se os tubos do bloco para esfriar e em seguida completou o volume para 50 mL com água destilada. Retirou-se 5 mL para proceder a determinação do teor de P ocluso (MURPHY e RILEY, 1962).

Para todos os extratos ácidos, realizou-se a neutralização com NaOH ( $10 \text{ mol}_c \text{ L}^{-1}$ ) na presença de 2 gotas de p-nitrofenol (1%) como indicador, para utilizar o método de determinação de Murphy e Riley, em substituição ao método de Dick e Tabatabai (1977), o qual utiliza reagentes tóxicos. A neutralização ocorre quando há mudança de cor do extrato, que geralmente é do transparente para o amarelo.

## CONCLUSÃO GERAL

Os fertilizantes fosfatados solúveis, monoamônio fosfato (MAP), superfosfato simples (SS) e o superfosfato triplo (ST) aumentam a produtividade da soja e os teores de P no solo nas frações lábeis e de menor labilidade. A aplicação do MAP na safra 2016/2017 em que houve menor disponibilidade hídrica na primeira metade do ciclo da soja apresentou redução da eficiência de uso do fertilizante, quando comparado as fontes de fosfatos de cálcico, como o SS e o ST. Todavia, em ano com maior disponibilidade hídrica a eficiência do MAP foi semelhante ao SS e do ST. Os altos teores de P residual, avaliados após a safra, óbitos principalmente com a aplicação das fontes a lanço, aumenta as perdas de P para frações de menor labilidade. A aplicação do fosfato reativo (FR), mesmo após quatro safras consecutivas, não proporcionou incrementos na produtividade de grãos da soja, e com menores incrementos nos teores de P das frações lábeis no solo, comparado as fontes solúveis.