

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Substâncias húmicas como aditivos para melhorar a eficiência de  
fosfatos solúveis e reativos**

**Mayara Martins e Martins**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas

**Piracicaba  
2019**

**Mayara Martins e Martins**  
**Engenheira Agrônoma**

**Substâncias húmicas como aditivos para melhorar a eficiência de  
fosfatos solúveis e reativos**

Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **PAULO SERGIO PAVINATO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e  
Nutrição de Plantas

**Piracicaba**  
**2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Martins, Mayara Martins e

Substâncias húmicas como aditivos para melhorar a eficiência de fosfatos solúveis e reativos / Mayara Martins e Martins. - - Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011- - Piracicaba, 2019.

68 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Fracionamento de fósforo 2. Adubação fosfatada 3. Labilidade de P 4. Solos de Cerrado I. Título

“Permitido a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

**DEDICATÓRIA**

**Aos meus pais Flávia e Pedro,  
Pelo amor, minha criação e educação**

**À minha irmã, Letícia,  
Por ser minha melhor amiga, confiar em mim e estar sempre presente**

**À minha avó Jieva (Eva),  
Por ser meu exemplo de mulher, amor e humildade**

**Ao meu namorado Gustavo,  
Pela força, paciência e carinho durante todos esses anos**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, pelo dom da vida. À Nossa Senhora de Aparecida por sempre iluminar meu caminho, me confortar nos instantes de dor e incertezas e por estar sempre me protegendo em momentos difíceis, a ti mãe ofereço minha eterna gratidão.

Aos meus pais Flávia Alaíde Martins e Martins e Pedro Luís Martins, pela compreensão, amor e dedicação que sempre tiveram comigo, por sempre acreditarem em mim e por ajudarem a vencer cada batalha, essa vitória é por vocês.

À minha irmã e melhor amiga, Letícia Martins e Martins, por sempre acreditar no meu potencial, estar sempre presente e torcer por minhas conquistas. Obrigada por mesmo longe estar presente.

Ao meu namorado, Gustavo Henrique da Silva, que esteve presente em todos momentos, sempre me apoiando e me fazendo confiante.

Ao meu orientador, prof. Dr. Paulo Sergio Pavinato, pela orientação, apoio, atenção, conselhos, paciência e ensinamentos durante esses anos de ensino e aprendizagem na realização desse trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, professores, técnicos e funcionários que contribuíram para minha formação, zelam pela organização, limpeza, segurança, alimentação e funcionamento dessa instituição.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, fazendo possível a realização desse Mestrado.

Ao meu orientador de graduação, prof. Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho, pelo incentivo em continuar na vida acadêmica, o qual me trouxe até aqui. Aos demais professores de graduação, da UNESP de Ilha Solteira, por todo conhecimento transmitido.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite e contribuírem com o aperfeiçoamento desse trabalho.

Às empresas SLC Agrícola SA e Heringer SA, em especial aos profissionais Vitor Vargas, Wesley, Marcus, Fábio Marin e demais envolvidos na pesquisa e desenvolvimento dessas empresas, obrigada pelo suporte oferecido.

Aos técnicos de laboratório, Luiz Silva, Denise, Néia e Nivanda, pelas conversas e ensinamentos transmitidos. Em especial à Néia e Nivanda, que foram duas mãezonas nesse percurso.

Aos companheiros do grupo de pesquisa, Marta Arruda, Adrielle Prates, Ana Paula, Mathaus, Gabriel, Wilfrand e Thaís, pela amizade durante esses anos. Ao Amin Soltangheisi pelas contribuições no trabalho e pelos ensinamentos transmitidos. A Bruna Arruda pela paciência, ajuda e ensinamentos no laboratório.

Em especial, às irmãs que Piracicaba me presenteou, Lilian Angélica Moreira, Cintia Masuco Lopes e Mariley de Cássia da Fonseca, muito obrigada pelo carinho, amor, horas de conversa e atenção. Vocês tornaram meus dias mais alegres nessa jornada.

A todos os amigos que me ajudaram durante essa trajetória, Silvia, Luis Fernando, Alexandre, Rafaela, Josimar, João Victor, João Willian, Ariádne, Mayara Rodrigues, Guilherme Meirelles, Flávia, Victor Plyro, Thales, Mariana Yamada, Marielle Berto.

À Talita Oshiro, minha irmã de coração e confidente, obrigada pela paciência, por tentar entender o que faço e acima de tudo, por mesmo não estando sempre presente fisicamente, estar presente nos meus dias.

À minha família, pelo exemplo, amor, carinho, dignidade e união.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para concretização de mais um sonho, mais um projeto, mais uma missão.

Muito obrigada!

## EPIGRAFE

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.*

*Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*

*Madre Teresa de Calcutá*

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,  
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou  
o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o  
que era antes”.*

*Martin Luther King*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	10
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	11
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1. Uso de fosfato no Brasil e no mundo.....	15
2.2. Reações do fósforo no solo.....	16
2.3. Solubilidade das fontes fosfatadas.....	17
2.4. Substâncias húmicas e potencial efeito na solubilização de P.....	19
2.5. Resposta da soja e do milho a adubação fosfatada.....	20
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	21
3.1. Descrição da área experimental.....	23
3.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	24
3.3. Condução do experimento.....	25
3.4. Atributos avaliados.....	26
3.4.1. Análise foliar.....	26
3.4.2. Análise química do solo.....	26
3.4.3. Fracionamento do fósforo.....	27
3.4.4. Produtividade e eficiência agronômica.....	28
3.5. Análise estatística.....	28
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
4.1. Análise foliar.....	29
4.2. Atributos químicos do solo.....	30
4.3. Fracionamento P.....	34
4.3.1. Frações de P no solo.....	34
4.3.2. Fósforo residual e fósforo total.....	44
4.3.3. Compartimento de fósforo segundo a labilidade.....	46
4.4. Produtividade das culturas.....	48
4.5. Eficiência agronômica.....	51
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	53
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53



## RESUMO

### **Substâncias húmicas como aditivos para melhorar a eficiência de fosfatos solúveis e reativos**

O fósforo (P) é um dos macronutrientes mais empregados como fertilizante na agricultura, muito em função de sua alta capacidade de fixação nos solos, que culmina em baixa disponibilidade e carência às plantas. Na adubação, é comum o uso de fontes solúveis de P, porém, devido aos impactos que as mesmas demandam para sua obtenção, vem se intensificando o uso de fosfatos naturais reativos (FNR) para seu fornecimento as plantas. Desse modo, é crescente os estudos sobre a associação de substâncias húmicas (SH) como aditivos potencializadores na solubilização de fosfato, tornando-os mais disponíveis. Mediante ao exposto, objetivou-se avaliar o efeito da associação de fosfatos solúveis e reativos com as SH na solubilização de P e no aproveitamento deste nutriente pelas culturas da soja e do milho em área de abertura recente do Cerrado. O experimento foi conduzido em campo, localizado em Querência - MT, em um solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, em dois anos agrícolas, disposto em um esquema fatorial 2x4+1, com três repetições em blocos ao acaso. Os tratamentos consistiram em 2 fontes fosfatadas (super fosfato triplo-TSP e FNR) e 4 doses de SH (0; 0,5; 1,0 e 2,0%) provenientes de leonardita, além de um tratamento controle absoluto. Os atributos avaliados foram; análise foliar da soja, análise química do solo e fracionamento sequencial de P após a colheita do milho segunda safra, produtividade e eficiência agrônômica de ambas as culturas. A produtividade da soja e do milho foi amplamente afetada pelas fontes fosfatadas utilizadas, com destacada vantagem do TSP em comparação ao FNR, que por sua vez não diferiu do controle em alguns tratamentos. O uso de SH nos fertilizantes não promoveu incrementos de produtividade, isso para ambas as fontes fosfatadas e ambas as culturas da soja e do milho.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo; Adubação fosfatada; Labilidade de P; Solos de Cerrado

## ABSTRACT

### **Humic substances as additives to improve the efficiency of soluble and reactive phosphates**

Phosphorus (P) is one of the macronutrients most used as fertilizer in agriculture, much due to its high soil binding capacity, which culminates in low availability and lack of plants. In fertilization is common the use of soluble sources of P, however, due to the impacts that they demand to obtain, the use of reactive natural phosphates (FNR) has been intensified to supply the plants. Thus, studies on the association of humic substances (SH) as potentiating additives in phosphate solubilization are increasing, making them more available. The objective of this study was to evaluate the effect of the association of soluble and reactive phosphates with SH on solubilization of P and the utilization of this nutrient by soybean and corn crops in a recently opened area of the Cerrado. The experiment was conducted in a field, located in Querência - MT, in a soil classified as Dystrophic Oxisol, in two agricultural years, arranged in a 2x4 + 1 factorial scheme, with three replications in randomized blocks. The treatments consisted of 2 phosphate sources (triple super phosphate and natural phosphate) and 4 SH doses (0, 0.5, 1.0 and 2.0%) from leonardite, in addition to an absolute control treatment. The evaluated attributes were; leaf analysis of soybean, soil chemical analysis and sequential fractionation of P after harvest of second crop corn, productivity and agronomic efficiency of both crops. Soybean and corn yields were largely affected by the phosphate sources used, with the advantage of TSP in comparison to FNR, which in turn did not differ from control in some treatments. The use of SH in fertilizers did not promote productivity increases, for both phosphate sources and both soybean and corn crops.

Keywords: Phosphorus fractionation; Phosphate fertilizing; P lability; Cerrado soils

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização da Fazenda Pioneira, Querência – MT, Brasil.....	23
<b>Figura 2.</b> Temperatura (°C) e precipitação pluvial (mm) médias mensais observadas nas safras 2016/17 e 2017/18. Querência – MT, Brasil. ....	26
<b>Figura 3.</b> Distribuição relativa das frações de labilidade em relação ao P total na avaliação de duas fontes de P (TSP e FRN) e quatro doses médias acumuladas de substâncias húmicas (0; 0,5; 1,0 e 2,0 % SH) na média das camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm).....	48
<b>Figura 4.</b> Produtividade média de grão da soja e do milho (kg ha <sup>-1</sup> ) na avaliação de duas fontes fosfatadas (TSP e FNR) e média das quatro doses de substâncias húmicas (0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante). Querência – MT, Safra 2016/17.....	50
<b>Figura 5.</b> Produtividade média de grãos da soja (kg ha <sup>-1</sup> ) sob duas fontes fosfatadas (TSP e FNR) e média das quatro doses de substâncias húmicas (0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante) para cultura da soja primeira safra. Safra 2017/18. Querência – MT, Brasil.....	51
<b>Figura 6.</b> Eficiência agronômica (kg kg <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> aplicado) das culturas da soja primeira safra e milho segunda safra de acordo com duas fontes de P (TSP e FNR) e média das doses de SH. Safra 2016/17. Querência –MT, Brasil. ....	52
<b>Figura 7.</b> Eficiência agronômica (kg kg <sup>-1</sup> de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> aplicado) da cultura da soja primeira safra de acordo com duas fontes de P (TSP e FNR) e média das doses de SH. Safra 2017/18. Querência –MT, Brasil. ....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Atributos químicos e granulometria do solo (camada de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) antecedendo a safra da soja 2016/17. Querência – MT, Brasil. ....	24
<b>Tabela 2.</b> Tratamentos aplicados na soja e no milho no momento da semeadura das culturas no campo. ....	25
<b>Tabela 3.</b> Teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na cultura da soja safra 2016/2017 influenciada por fontes de fosfato e doses de substâncias húmicas. Querência – MT, Brasil, 2017. ....	29
<b>Tabela 4.</b> Análise de variância (ANOVA) para atributos químicos do solo: pH em CaCl <sub>2</sub> , acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (M.O.), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%). Safra 2016/17. Querência – MT, Brasil. ....	31
<b>Tabela 5.</b> Análise dos atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 0-5 cm. Safra 2016/17, Querência – MT, Brasil. ....	32
<b>Tabela 6.</b> Análise dos atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 5-10 cm. Safra 2016/17, Querência – MT, Brasil. ....	32
<b>Tabela 7.</b> Análise dos atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 10-20 cm. Safra 2016/17, Querência – MT, Brasil. ....	33
<b>Tabela 8.</b> Análise de variância (ANOVA) para frações de P do fracionamento sequencial de Hedley. Querência – MT, Brasil. ....	34
<b>Tabela 9.</b> Teor de P inorgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) extraído pela RTA nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ....	36
<b>Tabela 10.</b> Teor de P inorgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) extraído por bicarbonato de sódio (NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup> ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ....	37
<b>Tabela 11.</b> Teor de P orgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) extraído por bicarbonato de sódio (NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup> ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ....	38
<b>Tabela 12.</b> Teor de P inorgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) extraído por hidróxido de sódio (NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ....	40
<b>Tabela 13.</b> Teor de P orgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) extraído por hidróxido de sódio (NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ....	41
<b>Tabela 14.</b> Teor de P inorgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) extraído por ácido clorídrico (HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup> ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ....	42
<b>Tabela 15.</b> Teor de P inorgânico (mg kg <sup>-1</sup> ) extraído por hidróxido de sódio 0,5 mol L <sup>-1</sup> (NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro	

doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ..... 43

**Tabela 16.** Teor de P orgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído por hidróxido de sódio ( $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ..... 44

**Tabela 17.** Teor de P residual ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ..... 45

**Tabela 18.** Teor de P total ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR). ..... 46

**Tabela 19.** Agrupamento das frações de P de acordo com a labilidade nas camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para a média das quatro doses médias de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR) ..... 47

**Tabela 20.** Produtividade média de grãos das culturas da soja primeira safra e do milho segunda safra considerando as quatro doses de substâncias húmicas aplicadas e média das fontes fosfatadas (TSP e FNR). Querência – MT, Safra 2016/17. .... 49

**Tabela 21.** Produtividade média de grãos das culturas da soja primeira safra e do milho segunda safra considerando as quatro doses de substâncias húmicas aplicadas e média das fontes fosfatadas (TSP e FNR). Querência – MT, Safra 2017/18. .... 50

## 1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais utilizados na agricultura, principalmente pela sua baixa disponibilidade às plantas (GULLO, 2002) e sua forte capacidade de fixação em solos tropicais (SHEN et al., 2011). Os solos da região do Cerrado brasileiro são naturalmente deficientes em P, havendo a necessidade da adubação fosfatada periodicamente, à qual é feita em doses acima das necessidades exigidas pelas plantas (NUNES et al., 2011). Essa característica, associada à alta capacidade que esses solos têm para reter o P na fase sólida, pode ser considerada uma das limitações para o desenvolvimento das atividades agrícolas (SOUSA; LOBATO, 2004). Segundo Novais e Smyth (1999), o processo da adsorção de P no solo é o principal responsável pelos baixos teores de fosfatos solúveis disponíveis para as culturas agrícolas.

Nas adubações, o P é geralmente fornecido às plantas na forma de fertilizantes fosfatados solúveis por ocasião da semeadura, sendo necessárias altas doses para obter produções comerciais, variando de 60 a 280 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para cultura da soja e do milho, em solos com disponibilidade inicial restrita de P (SOUZA et al., 2016). Para contornar o problema dos custos dos fosfatos solúveis obtidos pelos processos convencionais de solubilização, por acidulação em alta concentração, estudos propõem o uso de fontes alternativas de P de menor solubilidade (HARGER et al., 2007). O aumento da disponibilidade de P para as plantas pode ser obtido mediante o manejo correto da adubação fosfatada, com ênfase na fonte utilizada e no modo de aplicação mais adequado para solos com diferentes capacidades de adsorção do nutriente (TIRITAN et al., 2010).

O aumento da eficiência dos fertilizantes provenientes de rochas fosfatadas é dependente de novas técnicas, que atualmente estão sendo estudadas. A mistura de fosfatos naturais reativos (FNRs) com materiais orgânicos tem se mostrado bastante promissora (GIKONYO et al., 2006), isso porque os ácidos orgânicos desempenham importante função na dissolução de nutrientes no solo. Comprovadamente, Kpombrekou-A e Tabatabai (2003) realizaram um estudo com ácidos orgânicos de baixo peso molecular produzidos no solo como metabólitos microbianos ou exsudados de plantas, a fim de avaliar a influência deles na liberação de P das rochas fosfáticas com diferentes reatividades e concluíram que esses ácidos orgânicos foram eficientes na liberação de P das rochas fosfáticas de baixa a média reatividade e ineficientes para aquelas de alta reatividade.

De modo geral, a eficiência dos ácidos orgânicos em aumentar a disponibilidade de P no solo depende do pH, uma vez que a remoção de P adsorvido na rizosfera aumenta com a acidificação (GERKE, 1994), com o tipo de ânion orgânico e com sua persistência no solo, pois muitos desses ácidos orgânicos são degradados em poucos dias após a liberação dos resíduos vegetais (KIRK et al., 2000). Em meio onde estão presentes compostos orgânicos e

também as formas iônicas de ferro ( $\text{Fe}^{+2}$ ), alumínio ( $\text{Al}^{+3}$ ) e fosfato ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{-2}$ ), os compostos orgânicos tem preferência pelos íons  $\text{Fe}^{+2}$ , deixando os íons  $\text{PO}_4^{-3}$  mais livres para as plantas (WOLTHOORN et al., 2004), por outro lado, na ausência de compostos orgânicos os íons  $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  podem formar precipitados, indisponibilizando o P para as plantas.

Dessa forma, as hipóteses testadas foram que: (1) as substâncias húmicas reduzem a adsorção de P no solo proveniente de fertilizantes solúveis, deixando-o mais disponível em solução, e (2) a associação do fosfato reativo com as substâncias húmicas aumenta a solubilidade do fertilizante e a eficiência agrônômica para as culturas da soja e do milho. Para isso, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito da associação de fosfatos solúveis e reativos com substâncias húmicas na solubilização de P e no aproveitamento deste nutriente pelas culturas da soja e do milho em área de recente do Cerrado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Uso de fosfato no Brasil e no mundo

Os solos brasileiros, em geral, apresentam baixa disponibilidade em P, tornando o país um grande consumidor de fertilizantes fosfatados. Dado sua dependência para o desenvolvimento da agricultura, o consumo deste fertilizante triplicou nas últimas décadas, o que pode ser explicado pelo crescimento populacional e a preocupação com a otimização de áreas de produção. Ocupando o terceiro lugar no consumo de fertilizantes fosfatos do mundo, o Brasil perde apenas para a China e a Índia, além de ser um grande importador desse insumo, importou cerca 3 milhões de toneladas de  $P_2O_5$  em 2017, enquanto que a produção nacional ficou em torno de 2,1 milhões de toneladas (ANDA, 2018).

O P pode ser encontrado na natureza como fosfatos de rocha em jazidas distribuídas por todo o mundo (GONÇALVES et al., 2008), embora as maiores reservas mundiais estejam concentradas em Marrocos, China, Estados Unidos, África do Sul e Jordânia que, juntos, detêm 85 % das reservas da rocha – majoritariamente de origem sedimentar, que naturalmente possuem altos teores de  $P_2O_5$  (ITA, 2008). Os três maiores produtores mundiais são os Estados Unidos, a Rússia e o Marrocos (ALBUQUERQUE et al., 2005), os quais, juntamente com a China e Israel, fornecem o nutriente para os demais países. As rochas ígneas representam 15 % da produção mundial de fosfato, sendo o material mais comum no Brasil. Este tipo de rocha possui qualidade inferior à sedimentar, necessitando de beneficiamento mais intenso para a extração do nutriente, encarecendo o processo de fabricação (FONSECA, 2010).

As principais fontes de fosfatos naturais podem ser divididas em apatitas, que possuem baixa solubilidade e baixo teor de fósforo assimilável – aproximadamente 3 %, e fosforitas caracterizadas pela presença de minerais amorfos, solubilidade em torno de 5 % em citrato de amônio (TISDALE et al., 1993). Já as fontes de P para a agricultura são divididas em fosfatos naturais classificados como rocha fosfática moída cuja reatividade e eficiência agronômica é variável com o material de origem; termofosfatos que são rochas submetidas a um processo térmico; fosfatos alternativos que são oriundos da acidulação parcial do material de origem e posterior compactação; e os fosfatos totalmente acidulados (USGS, 2017).

Quanto ao efeito no suprimento de P para as plantas, Chien e Menon (1995) relataram que a eficiência agronômica das fontes de P pode ser afetada pelo tipo da fonte, propriedades do solo, práticas de manejo e a espécie vegetal. Para Novais e Smyth (1999) a principal influência deve-se à solubilização dos fosfatos; enquanto que para Khasawneh e Doll (1978) os fatores que afetam a eficiência agronômica são: a reatividade da fonte, tamanho de partículas, pH do solo, teor de cálcio e fósforo, textura do solo, eficiência de absorção pelas



plantas e o teor de matéria orgânica. Entretanto, a característica que melhor avalia a qualidade da fonte de P é sua capacidade em fornecer os nutrientes para as plantas conforme as exigências das culturas, e desse modo acarretar em acréscimo de produtividade (GOEDERT; SOUSA, 1984).

Prochnow, Alcarde e Chien (2003) acreditam que para uma maior produtividade das culturas o enfoque das pesquisas deve se concentrar em purificar a rocha fosfática, buscando mecanismos para o desenvolvimento de novos produtos fosfatados, uma vez que as indústrias realizam processos onerosos de modo a eliminar os contaminantes. Neste contexto uma alternativa para contornar essas dificuldades é o uso de fontes alternativas de P, como os fosfatos parcialmente acidulados, os termofosfatos e os fosfatos naturais (REDDY et al., 1999; KLIEMANN e LIMA, 2001; LANA et al., 2004), dentre outras, como resíduos da própria fabricação destes fertilizantes, que devido a eficiência do processo ainda contém P em sua composição. Como se sabe, as fontes de P são finitas (NESET; CORDELL, 2012), e desse modo, estudos para aumentar sua eficácia ganham cenário nas pesquisas. Espera-se aliar a isso fontes com menor solubilidade, de modo que esses produtos apresentem não só uma eficiência elevada, como também, menor custo de produção.

## **2.2. Reações do fósforo no solo**

O P é um nutriente importante para o desenvolvimento das plantas, e sua baixa disponibilidade limita a produção nos solos tropicais, altamente intemperizados, especialmente na região do Cerrado, pois estes solos apresentam intenso intemperismo, baixo pH e elevada saturação por alumínio, acarretando em uma alta capacidade de adsorção de P nos solos (SANZ-SAEZ et al., 2017). Essas áreas requerem maior atenção quanto ao uso do P, pois grandes quantidades deste elemento são necessárias para manter sua disponibilidade adequada às culturas, sendo este, um dos investimentos mais altos para a prática da agricultura comercial nesses solos.

O teor de P total nos solos pode variar, segundo Novais, Smyth e Nunes (2007) de 200 a 3.000 mg kg<sup>-1</sup>, sendo tal variação decorrente do material de origem, processos de gênese e as condições edafoclimáticas. A concentração média de P na solução do solo é aproximadamente 0,005 mg L<sup>-1</sup> e as plantas necessitam para seu desenvolvimento de uma concentração de 0,003 a 0,3 mg L<sup>-1</sup> de P na solução do solo, dependendo da espécie cultivada e da produção pretendida (HAVLIN et al., 2013).

Segundo Raij (2004), o P liberado pelos fertilizantes pode ser retido no solo com maior ou menor complexidade, ligando-se a compostos como o ferro (Fe), o alumínio (Al), o cálcio (Ca) e a matéria orgânica do solo (MOS). A predominância do nutriente é como íon fosfato

( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), e na fase sólida apresenta-se em formas orgânicas (Po) e inorgânicas (Pi), divididas para fins acadêmicos em fase lábil e não-lábil (RAIJ, 2001). O P lábil é o que se apresenta disponível para a solução do solo, ou fracamente adsorvido, enquanto o P não lábil é aquele que se encontra adsorvido por ligações mais fortes, tornando difícil o processo de dessorção do mesmo para a solução do solo (MATIAS, 2010).

O Po é originário dos resíduos vegetais adicionados ao solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição, tendo grande relevância em solos tropicais, pois regula a disponibilidade para as plantas. Suas principais formas são os fosfatos de inositol (10 a 80 % do P orgânico total), fosfolipídios (0,5 a 7 %), ácidos nucleicos (cerca de 3 %) e outros ésteres fosfato (aproximadamente 5 %) (DALAL, 1977). O Pi pode ser separado em duas partes, o P dos minerais primários (estrutural) e o P adsorvido. O P adsorvido pode ocorrer com todos minerais presentes no solo, podendo ser encontrado precipitado com formas iônicas de Fe, Al e Ca, adsorvidos a argilas silicatadas do tipo 1:1, adsorvidos a MOS, e adsorvidos aos oxi-hidróxidos de Fe e Al (PARFITT, 1978).

A disponibilidade de P no solo é controlada por processos físico-químicos, em longo prazo, como adsorção e dessorção e por processos biológicos, imobilização Pi e mineralização Po, que disponibilizam P a curto prazo para solução do solo (MARTINAZZO et al., 2007). O processo de adsorção do P a superfície dos colóides do solo ocorre na presença de grupos  $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}_2^+$ , que inicialmente sofre atração eletrostática rápida. Posteriormente, os grupos são deslocados pelos íons fosfato em solução, formando uma ligação covalente, de alta energia, entre o fosfato e os colóides, conhecido como quimiossorção ou adsorção específica, ocorrendo lentamente, chegando a levar anos para alcançar o equilíbrio (BARROW, 1986). O P é adsorvido principalmente pelos minerais goethita, hematita, magnetita (óxidos de Fe) e gibbsita (hidróxido de Al), ou seja, independente do teor de argila, se esses minerais estiverem presentes no solo, haverá maior probabilidade de adsorção do P. Por isso, para o adequado manejo de adubação fosfatada é necessário conhecer a composição mineralógica do solo na fração argila e não apenas o seu teor no solo (SCHAEFER et al., 2008).

### **2.3. Solubilidade das fontes fosfatadas**

Os fertilizantes fosfatados diferem quanto a química e física, devido a distinção entre os cátions acompanhantes, solubilidade, dureza, dentre outras características que interferem diretamente nas reações de adsorção e precipitação de P (COUTINHO et al., 1991). Os mesmos são divididos em fosfatos solúveis (industrializados) e fosfatos naturais reativos (FNR). Para produção dos fosfatos solúveis, usam-se as rochas fosfáticas submetidas a

processos de acidulação, os quais tornaram o fosfato prontamente disponível para a planta, enquanto os FNR são apenas submetidos a processos de moagem da rocha fosfática, onde a solubilidade depende do material de origem (NOVAIS, SMYTH, NUNES, 2007).

As fontes fosfatadas solúveis apresentam processo de produção complexo além de demandar alta energia e grandes quantidades de reagentes químicos (ácido sulfúrico e/ou fosfórico), o que acaba encarecendo muito seu custo (CEKINSKI, 1990) e promovendo problemas ambientais, uma vez que gera um residual dos reagentes ácidos utilizados nos processos químicos de extração e descarte de rejeitos da mineração em grandes volumes no ambiente. Já o uso direto do FNR pode ser uma alternativa mais barata e mais ambientalmente correta, porém deve-se considerar que essa fonte libera o P de maneira lenta para as plantas. Desse modo, a associação de FNR com uso de aditivos para melhorar sua eficiência estão cada vez mais sendo estudados, de modo que essa fonte possa ser promissora e suprir as necessidades das culturas em tempo hábil.

Com a acidulação de rochas fosfáticas obtêm-se os fertilizantes solúveis em água, sendo eles; superfosfatos simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), fosfato monoamônio (MAP) e fosfato diamônio (DAP), dos quais são responsáveis por mais de 90 % do P prontamente disponível para as plantas em áreas agrícolas (CHIEN et al., 2011). O SSP (18% de  $P_2O_5$  solúvel em citrato neutro de amônio em água (CNA) +  $H_2O$ ) e o TSP (41 % de  $P_2O_5$  solúvel em CNA +  $H_2O$ ) representam 50 % dos fertilizantes fosfatados fabricados no mundo (FASSBENDER e BORNEMISZA, 1994). Essas fontes fosfatadas com elevada solubilidade, apesar do investimento para sua produção, têm preferência na agricultura brasileira. Por outro lado, os FNRs estão conquistando cada vez mais o mercado, devido à rentabilidade de sua produção, apesar de apresentarem menor eficiência, possuem maior efeito residual (ANDA, 2016).

Os fosfatos naturais (FN) podem ser de origem sedimentar, ígnea ou metamórfica. Os de origem ígnea são poucos reativos no solo, uma vez que sua formação ocorreu a partir do resfriamento do magma, resultando em um material compacto e com baixa superfície específica (RAJAN, WATKINSON e SINCLAIR, 1996). Os de origem sedimentar se formam a partir da deposição acumulada de materiais como ossadas e esqueletos marinhos no fundo do mar. Já os de origem metamórfica sofreram alterações químicas nos fosfatos ígneos e nos sedimentares (HOROWITZ e MEURER, 2004). Aumentar a solubilidade dos FNR permitiria melhor aproveitamento das jazidas naturais de fosfatos. Os FNR não conseguem disponibilizar e suprir as exigências das culturas, devido a sua baixa dissolução (GUO et al., 2011), porém, apresentam melhor efeito residual com o passar do tempo nos solos, sendo considerados promissores na adubação fosfatada de longo prazo (FREITAS et al., 2013).

Por outro lado, buscando alternativas para melhorar a solubilização do FNR, o uso de enxofre elementar ( $S^0$ ) no solo tem sido utilizado como uma forma de redução do pH, uma

vez que o mesmo é oxidado por microrganismos (*Thiobacillus*), facilitando a solubilidade do FNR, além de fornecer enxofre na forma elementar (STAMFORD et al., 2007), o qual tende a ser oxidado e formar sulfato.

#### **2.4. Substâncias húmicas e potencial efeito na solubilização de P**

Várias técnicas têm sido estudadas no sentido de aumentar a eficiência das rochas fosfatadas (GIKONYO et al., 2006) e uma que tem se mostrado bastante promissora é a mistura dos FNR com materiais orgânicos. Minihoni et al. (1991) realizaram experimentos de incubação a fim de avaliar a influência de diversas fontes de carbono (glicose, bagaço de cana, palha de milho e vinhaça) na solubilização da apatita. Estes autores determinaram periodicamente o teor de P solúvel, e observaram que em presença de glicose houve maior solubilização do P e na ausência de carbono não houve liberação de P.

As substâncias húmicas (SH) compõem o compartimento da MO de maior reatividade e por isso encontram-se envolvidas na maioria das reações químicas do solo. Segundo Baldotto et al. (2013) as SH são compostos orgânicos condensados, produzidos pela ação microbiana, diferindo dos biopolímeros pela sua estrutura molecular e persistência no solo. Cerca de 80 a 90 % da MO dos solos é constituída por essas substâncias, as quais são representadas pelas frações, de acordo com sua solubilidade, em ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) e huminas (HU) (ZAVARZINA; ZAVARZIN, 2013).

Existem diversas hipóteses de como o material orgânico do solo pode apresentar efeito positivo na solubilização do P. Hu et al. (2001) demonstraram que o P e a MO poderiam atuar como antagonistas nos sítios de adsorção; Geelhoed, Van Riemsdijk e Findenegg (1999) mostraram que a MO poderia atuar como quelante nos óxidos de Fe e Al e carbonatos de Ca formando fosfatos solúveis, desse modo promovendo a maior disponibilidade de P no solo. Já Urrutia et al. (2014) verificaram que a associação da MO a íons metálicos e ao P podem formar complexos de fosfatos mais solúveis. Andrade et al. (2003) reportaram que a adição de ácidos orgânicos promoveu menor adsorção de P, ou seja, o uso de ácidos orgânicos diminui a adsorção do P pois compete pelos mesmos sítios de adsorção das argilas, resultando em aumento na concentração de P na solução do solo. Entretanto, salienta-se que a redução na adsorção de P está sujeita a natureza e composição de ácidos orgânicos, além da sua concentração e do pH do solo (HUNT et al., 2007).

De acordo com Matias (2010) ao adicionar uma fonte de P com elevada solubilidade ao solo juntamente com SH, para evitar que processos de adsorção diminua a disponibilidade de P é necessário que a fonte de SH esteja prontamente disponível para reagir rapidamente com os óxidos de Fe e Al, bloqueando os sítios de adsorção. De acordo com Antelo et al.

(2007), a forma como as SH são manejadas afetam sua eficiência, pois houve redução da adsorção de P quando as SH foram aplicadas antes ou depois da adubação fosfatada. Já para Fu et al. (2013), melhores resultados foram obtidos quando aplicaram previamente as SH no solo e depois realizaram a fertilização com P.

Cessa et al. (2010) observaram que a aplicação de SH aumentou os compostos orgânicos solúveis na solução do solo, culminando em incremento de cargas negativas, aumentando assim a competição por cargas positivas no solo, de modo que elas cumprem sua função em melhorar a disponibilidade de P no solo. Ainda como efeito benéfico, as SH podem melhorar a estrutura dos solos, aumentando a produtividade e a qualidade das culturas (BASAMBA et al., 2006). Portanto, as SH são consideradas como importantes reguladores funcionais dos processos químicos e biológicos que regem o solo e as plantas (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Porém, existe a possibilidade de efeitos antagônicos relacionados com as SH, como exemplificado por Pinheiro et al. (2010) ao trabalhar com mudas de eucalipto, o acréscimo na concentração de AH promoveu a redução da altura e do diâmetro da cultura. Mediante o exposto, ainda se faz necessário mais estudos sobre o uso de SH na disponibilidade de P. Espera-se que com a dissolução do FNR associada com as SH, possam alterar a dinâmica de liberação de P, uma vez que a mesma apresenta elevada CTC e podem ocupar os mesmos sítios de adsorção do P, deixando-o mais disponíveis para as plantas (PAVINATO; ROSOLEM, 2008).

## **2.5. Resposta da soja e do milho a adubação fosfatada**

Um dos principais fatores que limitam a produtividade das culturas é a adubação, isso porque as características específicas de cada nutriente podem promover perdas no solo como, por exemplo, a lixiviação ao longo do perfil e a fixação nos colóides do solo, afetando a produtividade. No Brasil, ainda existem problemas com o baixo aproveitamento dos fertilizantes fosfatados e, conseqüentemente, a má nutrição das plantas (SILVA et al., 2012). O P, por exercer funções diretamente relacionadas com o metabolismo das plantas; transferência de energia celular, respiração, fotossíntese, e pela sua baixa disponibilidade no solo, requer fornecimento suplementar via adubação (LAMBERS; PLAXTON, 2015).

No Brasil, as culturas de soja e milho ocupam, respectivamente, o primeiro e segundo lugar em área e em valor de produção. A soja, segundo a última estimativa da Conab no ano de 2019, demonstrou crescimento de 1,7 % da área plantada na safra 2018/19, ocupando cerca de 35,8 milhões de hectares, responsável pela safra de 119 milhões de toneladas. Para o milho, os dados recentes apontam que sua produção total para a safra 2018/19 será de 91

milhões de toneladas cultivadas em 16, milhões de hectares, superando a produção da safra anterior, com incremento de 12,9 %.

Na cultura do milho, as plantas deficientes em P sofrem redução na taxa de emissão e crescimento de folhas, particularmente do terço inferior da planta. Essa deficiência promove menor área foliar, com menor captação da radiação solar, acarretando em menos carboidratos, afetando assim o desenvolvimento do sistema radicular, e conseqüentemente, reduz a sua capacidade de absorção de P pela planta, o que prejudicará a formação e o desenvolvimento dos grãos. Vários solos cultivados com milho no país apresentam grande parte do P adsorvido aos colóides do solo, exigindo constantes aplicações do nutriente (ALVIM et al., 2011), encarecendo assim sua produção de modo a tornar a cultura menos rentável.

A cultura da soja também é bastante exigente em adubação fosfatada, onde, sem o fornecimento adequado do nutriente, sua produtividade é baixa, ocorrendo redução no porte da planta e na altura de inserção das primeiras vagens. Por outro lado, o adequado suprimento de P para a planta promove incrementos significativos na produção em áreas de Cerrado, já nos primeiros anos de cultivo. Trabalhos de pesquisa realizados por vários anos evidenciaram que à medida que se fornece doses de  $P_2O_5$  ocorre um aumento na produtividade (SFREDO, 2008). Da mesma forma, Vieira et al. (2015) observaram que as culturas da soja e do milho na região de produção do Paraná necessitam de maiores teores de P para promover ganhos de produtividade em relação aos cereais. Leite et al. (2017), avaliando o efeito da adubação fosfatada na soja durante três safras consecutivas na nova fronteira agrícola Brasileira (MATOPIBA), região do Cerrado, constaram influência positiva da adubação fosfatada na produtividade e nos parâmetros agronômicos para cultura da soja, evidenciando a importância da adubação para ganhos na produtividade das culturas, o que também foi comprovado por Neto et al. (2010) na soja.



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Descrição da área experimental

O experimento foi conduzido a campo, em área destinada para pesquisa da fazenda Pioneira, pertencente ao grupo SLC Agrícola SA, localizada em Querência, Mato Grosso (MT), região do Cerrado brasileiro (Figura 1). Situada nas coordenadas geográficas com latitude 12°6'5,301" S e longitude 52°25'11,224" W. A área plantada na safra 2017/18 foi 19.469 ha de soja e 7.571 ha de milho. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com teor de argila médio de 41 %.



**Figura 1.** Localização da Fazenda Pioneira, Querência – MT, Brasil.

O experimento foi conduzido em área de cultivo recente, cuja abertura do Cerrado foi realizada no ano 2014/2015, inicialmente com cultivo do milho. A área foi cultivada somente com soja nos ciclos seguintes e somente na safra 2016/2017, cultivou-se o milho segunda safra, em sucessão da soja. Logo após a abertura, a área foi submetida a gradagem de 36" e niveladora de 28" para incorporação de calcário dolomítico com PRNT de 65% (6 t ha<sup>-1</sup>). Para correção inicial, o solo recebeu fosfatagem, na dose de 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> sendo usado o superfosfato simples (SSP). Este fosfato foi parcelado em duas aplicações nos dois primeiros anos de cultivo, aplicados na linha do cultivo. Também foi aplicado 90 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O em superfície no momento da abertura da área.

O experimento foi iniciado no ano agrícola 2016/17 sendo cultivada a soja (cultivar AS3810 IPRO) em primeira safra e o milho (cultivar STATUS) em segunda safra. Já no ano agrícola 2017/18 cultivou-se a soja (cultivar W 787 RR) em primeira safra com sucessão do milho, sem o milho segunda safra.

Antes da instalação do experimento foram feitas amostragens do solo na área experimental, nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, visando caracterização do solo em relação aos atributos químicos e físicos. As amostras foram secas ao ar (TFSA),



peneiradas (< 2 mm) e submetidas a análises químicas para fins de fertilidade e granulométricas, segundo metodologias propostas por Raij et al. (2001) e Bouyoucos (1926), respectivamente (Tabela 1).

**Tabela 1.** Atributos químicos e granulometria do solo (camada de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) antecedendo a safra da soja 2016/17. Querência – MT, Brasil.

Prof. cm	pH CaCl <sub>2</sub>	P ----- mg dm <sup>-3</sup> -----	S	K	Ca	Mg ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	Al	H+Al
0-5	5,1	9	14	3,80	13	11	<2	28
5-10	4,9	7	12	2,22	17	16	<2	28
10-20	4,5	5	15	1,30	13	9	<2	28
20-40	3,9	<3	40	<0,9	6	3	4	34
Prof. cm	SB --- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ---	CTC	V ----- % -----	M	MO	Argila ----- g kg <sup>-1</sup> -----	Silte	Areia
0-5	27,8	55,8	50	0	17	413	78	508
5-10	35,2	63,2	56	0	16	405	21	574
10-20	23,3	51,3	45	0	17	416	11	573
20-40	9,8	43,8	22	29	12	463	12	525

### 3.2. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em blocos ao acaso, distribuído em parcelas de 27 x 200 m, com três repetições, disposto em um esquema fatorial 2x4+1 (2 fontes fosfatadas, 4 doses de substâncias húmicas e 1 controle absoluto). Toda a implantação das culturas e aplicação dos fertilizantes, bem como os tratos culturais e colheita foram executados mecanicamente.

As fontes fosfatadas avaliadas foram o fosfato solúvel (superfosfato triplo - TSP) e o fosfato reativo (FNR Heringer - OCP- Marrocos), sendo que ambos foram aditivados com as distintas doses de SH (ácidos húmicos, fúlvicos e huminas), fornecida pela empresa de fertilizantes Heringer SA. A origem das SH é proveniente de jazidas de leonardita, que apresentam alta solubilidade em água. As doses de 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % de SH foram incorporadas nos grânulos para testar o efeito dessas substâncias na disponibilidade de P no solo, assim como a não adição de SH. Adicionalmente teve-se tratamento controle sem aplicação de fosfato (Tabela 2).

As doses aplicadas de fosfato foram de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na soja (*Glycine max*) na primeira safra e de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no milho (*Zea mays*) em segunda safra, ambas considerando a recomendação oficial do boletim do Cerrado (SOUSA e LOBATO, 2004). O enxofre foi aplicado na dose de 25 kg ha<sup>-1</sup> de S na cultura da soja e 40 kg ha<sup>-1</sup> de S na cultura do milho, utilizando o S-elementar como fonte, sendo o mesmo incorporado nos grânulos do fosfato, com exceção do controle absoluto que não recebeu nenhum dos nutrientes via

adubação. A aplicação dos fertilizantes fosfatados foi realizada no sulco, por ocasião da semeadura das culturas.

Os demais fertilizantes – ureia (45% de N) e KCl (60% de K<sub>2</sub>O) - foram aplicados de acordo com a recomendação técnica para as culturas (99 kg ha<sup>-1</sup> de N para a cultura do milho e 90 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O para cultura da soja e do milho, respectivamente). Parte da dose de N no milho e todo o K (ambas) foram aplicadas a lanço no momento da semeadura. O restante do N no milho foi aplicado em cobertura, em duas aplicações com 4-5 e 7-8 folhas completamente abertas.

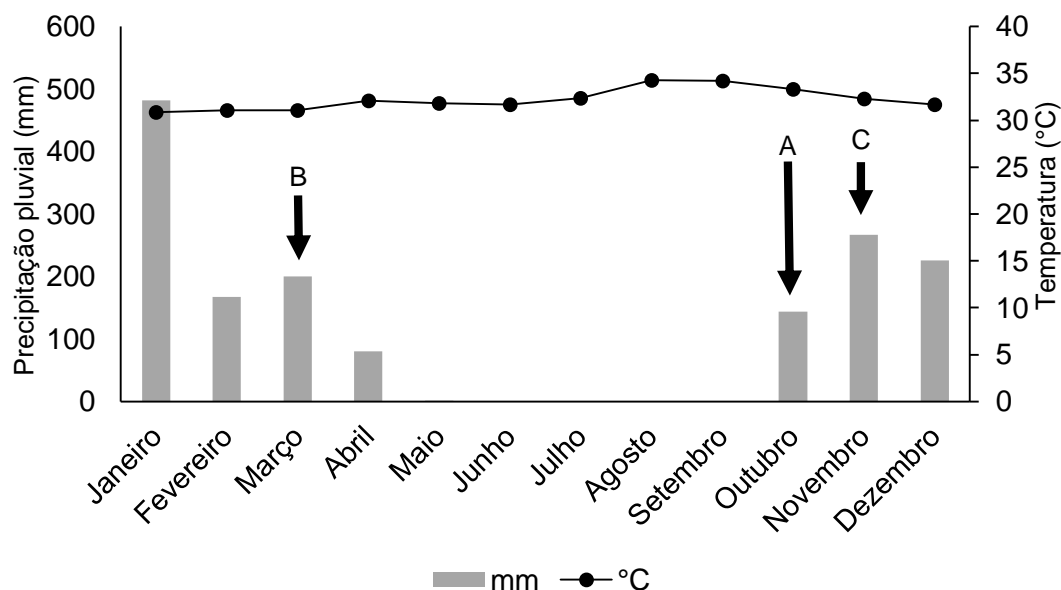
**Tabela 2.** Tratamentos aplicados na soja e no milho no momento da semeadura das culturas no campo.

Tratamento	Fonte de fosfato	Substâncias húmicas (%)
1	Controle	-
2	00.37.00 TSP Gold	0,0
3	00.37.00 TSP Gold	0,5
4	00.37.00 TSP Gold	1,0
5	00.37.00 TSP Gold	2,0
6	FNR Heringer 25% P total	0,0
7	FNR Heringer 25% P total	0,5
8	FNR Heringer 25% P total	1,0
9	FNR Heringer 25% P total	2,0

### 3.3. Condução do experimento

O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas em sistema de semeadura direta. No primeiro ano (safra 2016/17) com cultivo da soja em primeira safra (implantada em outubro de 2016), seguido do cultivo do milho segunda safra (semeado em março de 2017). Na safra de 2017/18 houve cultivo da soja primeira safra sendo sua semeadura realizada em novembro (2017), após a colheita em abril de 2018 foi implantado o milheto (*Pennisetum americanum*) apenas para cobertura do solo. O espaçamento utilizado para todas as culturas e safras foi de 0,45 m, exceto para o milheto que foi a lanço.

Os dados médios mensais de temperatura e precipitação pluvial durante as safras de 2016/17 e 2017/18 na cidade de Querência – MT encontram-se descritos na figura 2. As temperaturas médias mensais foram elevadas e praticamente constantes durante os cultivos agrícolas. Nota-se, que na região sempre há restrição hídrica entre os meses de abril/maio e setembro, o que ocasionou menores produtividades principalmente da cultura do milho em segunda safra, conforme será apresentado nos resultados.



**Figura 2.** Temperatura (°C) e precipitação pluviométrica (mm) médias mensais observadas nas safras 2016/17 e 2017/18. Querência – MT, Brasil. (A) Semeadura da soja – safra 2016/17, (B) semeadura do milho – safra 2016/17, (C) semeadura da soja – safra 2017/18.

**Fonte:** Dados compilados do Climate-data

### 3.4. Atributos avaliados

#### 3.4.1. Análise foliar

Para a soja, foram amostrados o terceiro trifólio com pecíolo, a partir do ápice, coletado no estágio de florescimento pleno (R2) segundo a metodologia descrita em Cantarella et al. (1997). Primeiramente foi feita a secagem do material em estufa com circulação de ar forçada, com temperatura média de 65 °C, por cerca de 72 horas, logo depois foi feita a moagem das folhas da soja em moinho tipo Wiley equipado com peneira com crivos de 1 mm. Destas amostras foram determinados os teores foliares de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre de acordo com a metodologia descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Para o milho não se procedeu a análise foliar em função de período de veranico antes do florescimento da cultura, o que afetou seu desenvolvimento e, por consequência, sua produtividade, como será apresenta nos resultados.

#### 3.4.2. Análise química do solo

Após a colheita do milho segunda safra (safra 2016/17), coletou-se amostras de solo em oito pontos por parcela, na linha de semeadura, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20

cm, com a ajuda de um amostrador automático acoplado a um quadriciclo, com haste de rosca para coleta. Nestas amostras de solo realizou-se análise química para levantamento da fertilidade do solo sendo determinados os seguintes atributos: P, K, Ca e Mg, extraídos com resina trocadora aniônica e catiônica; MO por colorimetria em dicromato de potássio; pH em  $\text{CaCl}_2$  (relação 1:2,5 de solo: solução); H + Al (correlação ao índice SMP); sendo ainda determinados matematicamente a saturação por cátions básicos no solo (V%) segundo Raij et al. (2001). Além disso, foram determinadas as frações lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis de P pelo método de Hedley, Stewart e Chauhan (1982).

### 3.4.3. Fracionamento do fósforo

O fracionamento do P foi realizado seguindo metodologia proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) com modificações de Condon, Goh e Newman (1985), metodologia amplamente difundida em estudos da dinâmica de P em sistemas agrícolas. A sequência do fracionamento é resumidamente descrita a seguir: amostras de 0,5 g de solo são submetidas à extratores em ordem sequencial, sendo eles:

- A) resina de troca aniônica - RTA (lâmina de RTA de dimensões de 1,0 por 2,0 cm imersa em 10 mL de  $\text{H}_2\text{O}$  em contato direto com o solo), extraíndo  $P_{\text{RTA}}$  inorgânico ( $P_{\text{iRTA}}$ );
- B)  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ , extraíndo  $P_{\text{BIC}}$  inorgânico e orgânico ( $P_{\text{iBIC}}$  e  $P_{\text{oBIC}}$ );
- C)  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ , extraíndo  $P_{\text{HID } 0,1}$  inorgânico e orgânico ( $P_{\text{iHID } 0,1}$  e  $P_{\text{oHID } 0,1}$ );
- D)  $\text{HCl}$  1,0 mol  $\text{L}^{-1}$ , extraíndo  $P_{\text{HCl}}$  inorgânico ( $P_{\text{iHCl}}$ );
- E)  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ , extraíndo  $P_{\text{HID } 0,5}$  inorgânico e orgânico ( $P_{\text{iHID } 0,5}$  e  $P_{\text{oHID } 0,5}$ ).

Dos extratos alcalinos ( $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$ ) retirou-se uma alíquota para determinação de  $P_{\text{TOTAL}}$  por digestão com persulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) em autoclave, onde o P orgânico foi obtido pela diferença do P total e o P inorgânico. O solo residual foi submetido à digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  +  $\text{H}_2\text{O}_2$  para obtenção do P residual ( $P_{\text{RESIDUAL}}$ ). O fósforo dos extratos ácidos (A e D, além das digestões totais de B, C e E) foi quantificado segundo Murphy e Riley (1962). Para os extratos alcalinos (B, C e E), a determinação do P inorgânico foi feita segundo proposto por Dick e Tabatabai (1977).

As frações de P quantificadas foram ainda agrupadas segundo a labilidade do P predita pelos extratores. O P lábil é composto pelo  $P_{\text{iRTA}}$ , somado ao  $P_{\text{BIC}}$  ( $P_{\text{i}}$  e  $P_{\text{o}}$ ); o P moderadamente lábil consiste nos teores de  $P_{\text{HID } 0,1}$  ( $P_{\text{i}}$  e  $P_{\text{o}}$ ) somados ao  $P_{\text{iHCl}}$  e o P não-lábil, composto pela soma do  $P_{\text{HID } 0,5}$  ( $P_{\text{i}}$  e  $P_{\text{o}}$ ) e do  $P_{\text{RESIDUAL}}$  ( $P_{\text{i}}$  e  $P_{\text{o}}$ ). Destaca-se que a opção por agrupamento do  $P_{\text{HID } 0,5}$  na fração não-lábil se deve a mudança na ordem de extração do procedimento, sendo observado que a extração com  $\text{HCl}$  intercalando as

extrações com NaOH potencializa a segunda extração com o hidróxido, restando menos P residual ao solo (P não-lábil). Ainda, sabendo-se que a extração com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, responsável por substituir a ultrassonificação do solo, também remove o P protegido por intra-agregados do solo, proporção esta que apenas seria considerada de labilidade moderada em casos de exaurimento de formas mais lábeis de P, é mais adequado assumir que o P<sub>HID 0,5</sub> não apresenta labilidade moderada, evitando assim possíveis equívocos na interpretação da dinâmica do P no solo em sistemas agrícolas.

#### 3.4.4. Produtividade e eficiência agrônômica

As produtividades da soja e do milho foram determinadas por meio da colheita de área útil total com uma passada de colhedora mecanizada, considerada 21 m x 200 m. A produtividade foi padronizada para 13 % de umidade tanto para soja como para o milho.

A eficiência agrônômica do P foi calculada através da fórmula

$$EAP = \frac{Y_{FERT} - Y_0}{Q_{FERT}}$$

Onde:

EAP = eficiência agrônômica do P (kg de grãos kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado)

Y<sub>FERT</sub> = produção média acumulada pela aplicação do fertilizante (kg ha<sup>-1</sup>)

Y<sub>0</sub> = produção média acumulada sem adição do fertilizante (kg ha<sup>-1</sup>)

Q<sub>FERT</sub> = dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do fertilizante avaliado para cada cultura (kg ha<sup>-1</sup>)

#### 3.5. Análise estatística

O programa SAS (Statistical Analysis System) 9.2 foi utilizado em todas as análises estatísticas, sendo os parâmetros avaliados pela análise de variância (ANOVA). Quando o teste F não apresentou significância (p > 0,05), considerou a igualdade entre os resultados. Para os resultados significativos e qualitativos procedeu-se com o teste de média Tukey (p < 0,05) ou modelo de regressão para resultados quantitativos, sendo escolhido o de melhor ajuste.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise foliar

Os teores de nutrientes nas folhas da soja (safra 2016/17) estão apresentados na tabela 3. De acordo com o Raij et al. (1997), as faixas adequadas para os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg e S para cultura da soja são, respectivamente: 40-54; 2,5-5,0; 17-25; 4-20; 3-10; 2,1-4,0 g kg<sup>-1</sup>. Nota-se que não houve diferenças significativas entre as fontes de P, porém, apenas a fonte TSP estava na faixa aceitável para o teor de N foliar (41,73 g kg<sup>-1</sup>). Já para o efeito das doses de SH, também não foram observadas diferenças significativas, no entanto, com exceção do tratamento controle os teores de N foliar estiveram dentro da faixa considerada adequada para a cultura da soja (Tabela 3).

**Tabela 3.** Teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) na cultura da soja safra 2016/2017 influenciada por fontes de fosfato e doses de substâncias húmicas. Querência – MT, Brasil, 2017.

Tratamentos	Nutrientes na folha da soja					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	----- g kg <sup>-1</sup> -----					
Fontes de P						
TSP	41,73	1,50	9,95	10,30	4,64	1,46
FNR	39,74	1,44	8,83	11,16	3,96	1,54
Controle	36,32	1,34	7,85	10,51	5,52	1,54
DMS	6,57	0,39	2,54	3,02	2,20	0,29
Doses SH (%)						
0,0	38,21 <sup>ns</sup>	1,42 <sup>ns</sup>	8,69 <sup>ns</sup>	9,97 <sup>ns</sup>	4,33 <sup>ns</sup>	1,48 <sup>ns</sup>
0,5	40,78	1,50	10,23	10,94	5,08	1,55
1,0	41,15	1,46	8,41	11,13	4,63	1,54
2,0	41,85	1,46	9,81	11,15	3,76	1,58
Média geral	40,25	1,46	9,22	10,71	4,43	1,53
C.V. (%)	11,01	18,17	18,57	19,03	33,52	12,52

<sup>ns</sup> não significativo a 5 % pelo teste F

Os teores foliares de P não diferiram entre as fontes analisadas e doses de SH (Tabela 3). De acordo com Novais e Smyth (1999), quanto mais P disponível no solo maior será o gradiente de concentração deste nutriente, acarretando, desse modo, acréscimo no teor de P na parte aérea. Tal fato contradiz os resultados apresentados nesse trabalho, pois os teores de P encontrados foram menores do que os teores mínimos adequados para a cultura. Apesar de imóvel no solo, o P é altamente móvel no floema das plantas, sendo grande parte redistribuído para as vagens, ou seja, removido da lavoura na ocasião da colheita.

Com relação aos teores de K, notou-se que estão abaixo da faixa recomendada para a cultura. Já para os teores de Ca e Mg, verificou-se que estão adequados para a cultura da

soja, sendo que não houve efeito dos tratamentos (Tabela 3). Apesar de a cultura ter recebido adubação com S elementar, os teores de S nas plantas ficaram abaixo dos adequados para o pleno desenvolvimento da soja. Assim, com exceção dos teores de Ca e Mg, os demais nutrientes estavam abaixo dos teores adequados.

As fontes de fertilizantes fosfatados e as doses de SH utilizadas não influenciaram significativamente na nutrição da cultura da soja. Uma explicação para a ausência de resposta dos teores foliares em função da adubação fosfatada pode ser atribuído pelo estresse hídrico ocorrido no momento de maior necessidade de água da cultura da soja (Figura 1). De acordo com informações de literatura mais recente, considerando cultivares mais modernas, os teores atuais observados não são comprometedores do rendimento das culturas, uma vez que as tabelas do boletim Cerrado e outros boletins do Brasil, referem-se a cultivares utilizadas há mais de duas décadas, embora pode-se notar que a média de produtividade de grãos da soja foi abaixo das expectativas de rendimento nas áreas adjacentes ao experimento.

#### **4.2. Atributos químicos do solo**

A análise de variância (Teste F) para os atributos químicos do solo realizados após a colheita do milho segunda safra encontram-se na tabela 4. Os resultados indicam que houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para as fontes de P, porém não foi observado efeito das doses de SH e também não houve interação significativa entre as fontes de P e as doses de SH utilizadas.

**Tabela 4.** Análise de variância (ANOVA) para atributos químicos do solo: pH em CaCl<sub>2</sub>, acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (M.O.), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%). Safra 2016/17. Querência – MT, Brasil.

Causa de variação	Atributos químicos do solo								
	M.O.	pH	H+Al	P	Ca	Mg	K	CTC	V %
<b>0 – 5 cm</b>									
Fontes	ns	*	ns	*	*	ns	ns	*	*
Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fonte X Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	12,04	4,95	13,99	27,29	17,84	18,93	14,71	8,72	8,74
<b>5 – 10 cm</b>									
Fontes	ns	ns	*	*	*	ns	ns	*	ns
Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fonte X Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	3,73	5,04	15,83	29,39	19,95	27,51	19,25	12,04	9,81
<b>10 – 20 cm</b>									
Fontes	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	*	ns
Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Fonte X Dose	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	6,71	4,60	17,64	62,69	8,60	26,09	22,31	9,96	9,82

\* significativo a 5 % pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

P, K, Ca e Mg, extraídos com resina; MO por colorimetria; pH em CaCl<sub>2</sub> e H + Al (SMP).

Na camada superficial (0-5 cm) nota-se que os atributos pH, P, Ca, CTC e V% diferiram do controle para as fontes de P (Tabela 5). O pH do solo aumentou com as fontes fosfatadas quando comparado com o controle na camada mais superficial, diferente das demais camadas, cujo efeito da utilização da fonte não foi afetado. O teor de P foi superior nos tratamentos com as fontes de P em relação ao controle. Resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Rosan, Silva e Maluf (2018) para o TSP.

Com relação ao Ca trocável do solo, houve aumento nas camadas mais superficiais com a aplicação de FNR, isso se deve ao fato desta fonte apresentar alto teor de Ca na sua constituição. Já os atributos CTC e V% foram superiores com a utilização da fonte FNR, muito em consequência da quantidade de Ca adicionada via esta fonte fosfatada.



**Tabela 5.** Análise dos atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 0-5 cm. Safra 2016/17, Querência – MT, Brasil.

Tratamentos	M.O. g dm <sup>-3</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	Ca ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	K ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	CTC ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	V %
Fontes de P									
TSP	33,77	5,20 a	29,36	78,63 a	18,24 b	8,94	2,13	58,70 b	50,05 b
FNR	32,96	5,30 a	26,58	61,95 a	28,27 a	9,72	2,39	62,95 a	60,46 a
Controle	28,60	4,90 b	27,80	15,73 b	16,70 b	9,80	2,10	56,40 b	50,77 b
DMS	5,86	0,39	5,80	25,97	5,95	2,63	0,49	8,03	7,09
Doses SH (%)									
0	31,74	5,40	26,56	52,83	21,80	8,87	2,38	59,62	55,22
0,5	33,32	5,10	28,88	75,30	24,43	8,60	2,18	64,10	54,33
1,0	32,95	5,40	28,20	74,68	21,68	10,53	2,25	62,67	54,93
2,0	33,86	5,20	28,88	59,80	22,55	9,78	2,10	63,30	54,32
Média geral	32,83	5,20	27,96	64,23	22,53	9,38	2,24	62,11	54,75
C.V. (%)	12,04	4,95	13,99	27,29	17,84	18,93	14,71	8,72	8,74

Médias seguidas de letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %  
P, K, Ca e Mg, extraídos com resina; MO por colorimetria; pH em CaCl<sub>2</sub> e H + Al (SMP).

Na camada de 5-10 cm (Tabela 6) nota-se que os atributos H+Al, P, Ca e CTC foram incrementados com a adição de fosfatos em relação ao controle. O efeito dos elementos tóxicos, como o Al, poderiam ter sido amenizados se a faixa de pH do solo estivesse entre 5,5 e 6,0 a qual promoveria maior disponibilidade de nutrientes para as plantas. Uma provável explicação que pode ter ocorrido para pronunciar diferenças estatísticas na acidez potencial foi a faixa inferior de pH nessa camada, entre 5 – 5,17.

O Ca assim como a CTC apresentaram comportamento semelhante nessa camada, onde as fontes de P diferiram apenas do controle. Mackay e Syers (1986) relataram em seu trabalho que os teores de Ca estão associados a saturação na CTC do solo, onde menores valores de Ca levam a menores valores apresentados na CTC, corroborando com os dados apresentados nesse estudo.

**Tabela 6.** Análise dos atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 5-10 cm. Safra 2016/17, Querência – MT, Brasil.

Tratamentos	M.O. g dm <sup>-3</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	Ca ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	K ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	CTC ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	V %
Fontes de P									
TSP	33,83	5,16	27,20 a	41,88 a	19,44 a	10,79	1,99	64,78 a	49,45
FNR	34,58	5,17	32,58 a	27,88 a	20,93 a	11,35	2,30	61,82 a	55,89
Controle	32,87	5,08	22,50 b	13,57 b	13,50 b	11,63	2,20	49,83 b	54,77
DMS	1,88	0,39	6,82	14,02	5,75	4,54	0,61	11,03	7,69
Doses SH (%)									
0	33,74	5,36	28,28	25,83	20,02	10,79	2,43	61,53	54,25
0,5	33,75	5,15	29,35	41,13	15,67	10,07	1,92	57,02	48,87
1,0	33,37	5,16	29,18	32,95	22,10	13,25	1,95	66,53	56,08
2,0	35,52	5,08	29,87	32,08	19,68	10,60	2,17	62,28	51,73
Média geral	34,06	5,21	29,07	32,21	19,44	11,13	2,15	61,81	52,90
C.V. (%)	3,73	5,04	15,83	29,39	19,95	27,51	19,25	12,04	9,81

Médias seguidas de letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %  
P, K, Ca e Mg, extraídos com resina; MO por colorimetria; pH em CaCl<sub>2</sub> e H + Al (SMP).

Na camada de 10-20 cm evidencia-se efeito das fontes de P, para os teores de Ca do solo e a CTC (Tabela 7). Para o Ca, as fontes de P diferiram entre si e entre o controle, sendo o TSP superior. Já para a CTC, as fontes de P diferiram-se apenas do controle. De maneira geral, o teor de Ca disponível no solo foi significativo em todas camadas analisadas (0-5, 5-10 e 10-20 cm), onde as fontes de P diferiram do controle; podendo ser explicado uma vez que ambas possuem Ca em sua composição. A legislação rege que os FNR e o TSP devem possuir no mínimo 20% e 13% de Ca, respectivamente.

Os valores de CTC diferiram entre o controle e as fontes de P, provavelmente pelo aumento do teor de Ca no solo, uma vez que a CTC é calculada indiretamente pela soma dos cátions presentes. Segundo Lobo et al. (2013) esse aumento também pode ser explicado em decorrência do aumento da MOS (Tabelas 5, 6 e 7). Para os demais nutrientes e atributos químicos não se observou nenhuma relação entre as fontes fosfatadas utilizadas e as doses de SH aplicadas nas camadas analisadas do solo.

**Tabela 7.** Análise dos atributos químicos de fertilidade do solo na camada de 10-20 cm. Safra 2016/17, Querência – MT, Brasil.

Tratamentos	M.O. g dm <sup>-3</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	Ca ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	Mg mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	K ----- mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----	CTC	V %
Fontes de P									
TSP	30,64	5,20	26,66	26,77	18,53 a	9,82	1,36	56,38 a	52,56
FNR	33,04	5,30	25,54	27,20	15,74 b	9,08	1,72	52,09 a	51,08
Controle	29,63	5,10	21,00	12,10	13,20 c	11,53	1,60	47,33 b	56,33
DMS	3,14	0,39	6,67	23,58	2,13	3,74	0,51	7,89	7,61
Doses SH (%)									
0	30,77	5,40	24,60	23,54	16,64	9,92	1,75	52,94	53,77
0,5	33,27	5,10	27,18	27,37	16,62	9,22	1,58	54,58	50,07
1,0	31,22	5,40	22,92	27,93	17,87	10,78	1,23	52,83	56,55
2,0	31,55	5,20	27,90	23,40	15,70	8,68	1,50	53,77	48,18
Média geral	31,59	5,20	25,53	25,34	16,70	9,68	1,54	53,47	52,32
C.V. (%)	6,71	4,95	17,64	62,69	8,60	26,09	22,31	9,96	9,82

Médias seguidas de letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 % P, K, Ca e Mg, extraídos com resina; MO por colorimetria; pH em CaCl<sub>2</sub> e H + Al (SMP).

Em geral, o incremento das concentrações de SH não aumentam os teores de P resina no solo, corroborando com o trabalho de Rosan, Silva e Maluf (2018). Em seu trabalho, esses autores apresentaram que o uso de SH com SSP aumentou os teores extraíveis de P de um Latossolo Vermelho, o que não foi evidenciado com as fontes de P testadas. O efeito da aplicação de SH no solo tem limitações, quanto ao tipo de produto (LITTLE et al., 2014), dose e concentração a ser aplicada (NIKBAKHT et al., 2008; LEVENTOGLU e ERDAL, 2014). Desse modo, espera-se que esses resultados sejam melhores do que a ausência de SH quando utilizado o FNR, isso porque as SH podem contribuir para menor adsorção de P no solo, fato este explicado, uma vez que as mesmas ocupam sítios de adsorção, complexando Fe, Al e Ca, assim como evidenciado por Erro et al (2012) e por Rosan, Silva e Maluf (2018).

### 4.3. Fracionamento P

A análise de variância (teste F) para as frações de P do fracionamento de Hedley está apresentada na tabela 8. Os resultados indicam que houve significância para as fontes de P as doses de SH utilizadas e também interação entre fonte P x dose SH nas profundidades analisadas. Na camada 0-5 cm houve efeito significativo para as fontes de P e para as doses de SH em todas as frações. Houve interação fonte x dose nas frações  $P_{iBIC}$ ,  $P_{oBIC}$ ,  $P_{iHID\ 0,1}$ ,  $P_{oHID\ 0,1}$ ,  $P_{HCl}$ , e  $P_{iHID\ 0,5}$ .

Na camada de 5-10 cm obteve-se efeito significativo para fonte de P para as frações  $P_{RTA}$ ,  $P_{iBIC}$ ,  $P_{oBIC}$ ,  $P_{oHID\ 0,1}$ ,  $P_{HCl}$  e  $P_{oHID\ 0,5}$ . As doses de SH influenciaram significativamente as frações  $P_{RTA}$ ,  $P_{iBIC}$ ,  $P_{oBIC}$ ,  $P_{oHID\ 0,1}$  e  $P_{HCl}$ . Nessa camada, também houve interação fonte de P x dose de SH apenas para as frações  $P_{RTA}$ ,  $P_{iBIC}$  e  $P_{HCl}$ .

Já na camada de 10-20 cm verificou-se efeito significativo das fontes de P nas frações  $P_{RTA}$ ,  $P_{iBIC}$ ,  $P_{oBIC}$ ,  $P_{iHID\ 0,1}$ ,  $P_{oHID\ 0,1}$ ,  $P_{HCl}$  e  $P_{oHID\ 0,5}$ . As doses de SH mostram-se significativas nas frações  $P_{RTA}$ ,  $P_{iBIC}$ ,  $P_{oBIC}$ ,  $P_{oHID\ 0,1}$ ,  $P_{HCl}$  e  $P_{TOTAL}$ . Também houve interação fonte de P x dose de SH para as frações  $P_{RTA}$ ,  $P_{iBIC}$ ,  $P_{oBIC}$ ,  $P_{oHID\ 0,1}$ ,  $P_{HCl}$  e  $P_{TOTAL}$ .

**Tabela 8.** Análise de variância (ANOVA) para frações de P do fracionamento sequencial de Hedley. Querência – MT, Brasil.

Causa de variação	Frações de P do fracionamento proposto por Hedley									
	$P_{iRTA}$	$P_{iBIC}$	$P_{oBIC}$	$P_{iHID\ 0,1}$	$P_{oHID\ 0,1}$	$P_{HCl}$	$P_{iHID\ 0,5}$	$P_{oHID\ 0,5}$	$P_{RESIDUAL}$	$P_{TOTAL}$
Profundidade 0 – 5 cm										
Fontes P	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Dose de SH	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
FonteXDose	ns	*	*	*	*	*	*	ns	ns	ns
C.V. (%)	13,65	5,34	17,80	7,62	15,01	20,30	16,06	45,17	14,07	12,21
Profundidade 5 – 10 cm										
Fontes P	*	*	*	ns	*	*	ns	*	ns	ns
Dose de SH	*	*	*	ns	*	*	ns	ns	ns	ns
FonteXDose	*	*	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
C.V. (%)	11,10	8,97	16,83	11,31	15,59	20,61	18,41	80,11	11,92	13,00
Profundidade 10- 20 cm										
Fontes P	*	*	*	*	ns	*	ns	*	ns	ns
Dose de SH	*	*	*	ns	*	*	ns	ns	ns	*
FonteXDose	*	*	*	ns	*	*	ns	ns	ns	*
C.V. (%)	9,05	14,45	13,81	13,90	18,10	45,24	20,10	47,94	10,41	5,77

\* significativo a 5 % pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

#### 4.3.1. Frações de P no solo

De modo geral, em todas as camadas analisadas, os teores de P foram inversamente proporcionais a profundidade, ou seja, a camada superficial apresentou maiores valores de P do que as camadas subjacentes, corroborando Rheinheimer e Anghinoni (2001). Esses mesmos autores citam que, em solos pouco intemperizados, a maior parte deste elemento se

encontra na fração orgânica (Po), ou na fração mineral (Pi), adsorvida fortemente aos minerais secundários, já em solos bem intemperizados há maior predomínio de Pi em frações fortemente adsorvidas aos minerais. Em solos submetidos a um sistema de semeadura direta nota-se maior concentração de P nas camadas superficiais, devido à localização da adubação, menores perdas por erosão, ausência do revolvimento do solo e ciclagem de nutrientes pelas plantas (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001).

A resina trocadora aniônica (RTA) é o primeiro extrator usado no fracionamento de Hedley e extrai formas de P prontamente disponíveis para as plantas, ou seja, P dissolvido na solução do solo. Para os teores de  $P_{RTA}$ , a fonte TSP foi superior ao FNR, que por sua vez, foi superior ao controle (Tabela 9). O decréscimo nos teores de P nesta fração em profundidade pode ser atribuído à sua baixa mobilidade, ao não revolvimento dos solos e à aplicação dos fertilizantes nas camadas superficiais (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001).

Esse feito pode ter ocorrido devido a maior solubilização do TSP quando comparada ao FNR, e que, por ser um sistema de semeadura direta, nas camadas superficiais o maior aporte de MO evita parcialmente a adsorção específica do fosfato, aumentando assim sua disponibilidade em solução (GUPPY et al., 2005). A maior redistribuição de Pi inorgânico no perfil de solo em sistema de semeadura direta, observada aqui com o TSP, tem sido atribuída à liberação mais intensa de ácidos orgânicos, complexação do  $Al^{3+}$  trocável e decomposição das raízes no solo em profundidade (PAVINATO e ROSOLEM, 2008).

Quanto ao efeito de SH na mistura dos fertilizantes, Zhen-Yu et al. (2013) ao comparar os efeitos de fertilizantes monocálcicos combinados ou não com ácidos húmicos, observaram que a adição de SH ao fertilizante monocálcico aumentaram a mobilidade do P. A atuação das SH em promover a diminuição da adsorção de P nos solos pode ser explicada pelo bloqueio nos sítios de adsorção dos minerais de argila, que por sua vez podem adsorver as SH competindo assim com os fosfatos pelos mesmos sítios de adsorção (BHATTI et al., 1998; ALMEIDA et al., 2003; ARAÚJO et al., 2004; SOUZA et al., 2006), corroborando os dados apresentados no presente trabalho na camada mais superficial, com aumento do  $Pi_{RTA}$  sob TSP e maiores doses de SH.

Para a fonte de P, na camada superficial, os teores médios para  $Pi_{RTA}$  foram de  $37,74 \text{ mg kg}^{-1}$  para TSP e de  $10,04 \text{ mg kg}^{-1}$  para FNR, diferindo-se dos valores encontrados para o controle ( $2,75 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Já para camada 5-10 cm, os teores médios  $Pi_{RTA}$  foram  $12,82 \text{ mg kg}^{-1}$  para TSP e de  $5,61 \text{ mg kg}^{-1}$  para FNR, que por sua vez, não se diferiu do controle ( $4,20 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Por fim, na camada de 10-20 cm, os teores médios  $Pi_{RTA}$  foram  $7,31 \text{ mg kg}^{-1}$  para o TSP e  $4,19 \text{ mg kg}^{-1}$  para o FNR, que, assim como na camada de 5-10 cm não se diferiu do controle ( $3,60 \text{ mg kg}^{-1}$ ). O TSP mostrou-se mais eficiente que o FNR para manter teores maiores de  $Pi_{RTA}$  nas três camadas analisadas.

Para as doses de SH, nas camadas de 0-5 e 10-20 cm, a melhor dose encontrada foi de 1 % SH do volume de fertilizante, enquanto na camada de 5-10 cm, melhor dose foi a de 0,5 % SH. Houve interação na fonte P x dose SH. Ao comparar as médias, o TSP mostrou-se superior nas doses 0,5 e 1,0 % SH respectivamente nas camadas 0-5 e 10-20 cm. Já para o FNR, na camada 5-10 cm, a ausência de SH (0 % SH) foi superior, enquanto que para camada 10-20 cm, a dose 1,0 % SH obteve melhores respostas.

**Tabela 9.** Teor de P inorgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído pela RTA nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	2,75 C
	TSP	30,93 <sup>ns</sup>	26,70	49,40	43,92	37,74 A
	FNR	11,51 <sup>ns</sup>	9,81	9,82	9,01	10,04 B
	Média	21,22 b	18,26 b	29,61 a	26,47 b	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	4,20 B
	TSP	11,89 <sup>ns</sup>	16,41	10,80	12,18	12,82 A
	FNR	7,13 <sup>(1)</sup>	4,80	5,72	4,80	5,61 B
	Média	9,51 b	10,60 a	8,26 b	8,49 b	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	3,60 B
	TSP	7,73 <sup>ns</sup>	6,00	8,76	6,74	7,31 A
	FNR	4,13 <sup>(2)</sup>	4,45	4,41	3,78	4,19 B
	Média	5,93 b	5,23 b	6,58 a	5,26 b	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5% pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(1)</sup>  $Y = 6,79 - 2,57x + 0,81x^2$  ( $r^2 = 0,61^*$ )

<sup>(2)</sup>  $Y = 4,14 + 0,78x - 0,48x^2$  ( $r^2 = 0,99^*$ )

Na sequência do fracionamento temos o  $P_i$  extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  ( $P_{iBIC}$ ) que assim como o  $P_{iRTA}$ , também é considerado lábil, porém trata da fração que a resina não conseguiu extrair, ou seja, P que está adsorvido fracamente na superfície cristalina dos minerais. A extração dessa fração é resultante do aumento do pH promovido pelo extrator, ocorrendo a troca de  $\text{OH}^-$  pelo  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  fracamente adsorvido pelos argilominerais e óxidos de Fe e Al.

Em geral, os teores de  $P_{iBIC}$  foram superiores aos de  $P_{iRTA}$  (Tabela 10). A fonte de TSP foi superior ao FNR, independente da dose de SH aplicada. Vários autores (REDEL et al., 2007; GONÇALVES e MEURER, 2009; PAVINATO et al., 2009) indicaram que o  $P_{iRTA}$  sozinho não é representativo do total de P lábil do solo, sendo necessário, portanto, a junção das frações  $P_{iBIC}$  e  $P_{oBIC}$  para compor o P lábil, ou seja, P disponível para absorção das plantas no solo. Na camada superficial os teores médios para o  $P_{iBIC}$  foram de 44,68  $\text{mg kg}^{-1}$  para TSP e de 12,69  $\text{mg kg}^{-1}$  para FNR, diferindo-se dos valores encontrados para o controle (8,09  $\text{mg kg}^{-1}$ ). Para a camada 5-10 cm os teores médios  $P_{iBIC}$  foram 16,39  $\text{mg kg}^{-1}$  para TSP de

10,91 mg kg<sup>-1</sup> para FNR, diferindo-se dos valores encontrados para o controle (9,12 mg kg<sup>-1</sup>). Já na camada de 10-20 cm os teores médios P<sub>BIC</sub> foram 14,44 mg kg<sup>-1</sup> para o TSP e 10,84 mg kg<sup>-1</sup> para o FNR, e apenas o TSP diferiu-se do controle (10,84 mg kg<sup>-1</sup>).

Para as doses de SH houve efeito significativo nas camadas de 0-5 e 10-20 cm respondendo as doses 2,0 e 1,0 % de SH respectivamente. A interação fonte P x dose SH foi significativa em todas as camadas analisadas. Ao comparar as médias, para o TSP, encontrou-se efeito decrescente das doses com o aumento da profundidade, ou seja, 1,0; 0,5 e 0 % SH. Já para o FNR, na camada superficial, a dose mais responsiva foi a de 2,0 % SH, enquanto que para as demais camadas, obteve-se maiores teores na dose de 1,0 % SH.

**Tabela 10.** Teor de P inorgânico (mg kg<sup>-1</sup>) extraído por bicarbonato de sódio (NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	8,09 C
	TSP	51,45 <sup>ns</sup>	28,48	52,75	45,95	44,68 A
	FNR	9,55 <sup>(3)</sup>	12,30	10,67	18,24	12,69 B
	Média	30,50 b	20,39 b	31,71 b	32,09 a	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	9,12 C
	TSP	18,67 <sup>(4)</sup>	20,14	15,32	11,44	16,39 A
	FNR	11,71 <sup>ns</sup>	9,21	13,08	9,64	10,91 B
	Média	15,19 a	14,68 b	14,20 b	10,54 b	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	11,53 B
	TSP	19,88 <sup>(5)</sup>	12,13	13,68	12,05	14,44 A
	FNR	7,74 <sup>(6)</sup>	10,92	15,32	9,38	10,84 B
	Média	13,81 b	11,52 b	14,50 a	10,72 b	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5% pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(3)</sup> Y= 10,21 - 0,37x + 2,13x<sup>2</sup> (r<sup>2</sup>=0,88\*)

<sup>(4)</sup> Y= 19,35 - 1,31x - 1,38x<sup>2</sup> (r<sup>2</sup>=0,88\*)

<sup>(5)</sup> Y= 18,99 - 10,85x + 3,77x<sup>2</sup> (r<sup>2</sup>=0,77\*)

<sup>(6)</sup> Y= 7,24 + 12,99x - 5,92x<sup>2</sup> (r<sup>2</sup>=0,90\*)

De acordo com Marcolan (2006), o P no solo também é acumulado em frações orgânicas, onde a ciclagem de nutrientes de camadas mais profundas para a superfície e a competição de compostos orgânicos hidrossolúveis pelos sítios de adsorção podem aumentar a sua disponibilidade. A fração P<sub>o</sub> oscila de 15 a 80% do P<sub>TOTAL</sub> nos solos (STEVENSON, 1994), contribuindo essencialmente para a disponibilidade de P por meio do processo de mineralização. As diferentes formas de P<sub>o</sub> no solo, separadas em frações (de acordo com o extrator) diferem em estabilidade e disponibilidade para as plantas. Nesse contexto, os sistemas de manejo do solo modificam a dinâmica do P e alteram as formas de P<sub>o</sub> em decorrência de práticas agrícolas, tais como as adubações mineral e orgânica (MACHADO et al., 1993).

O Po extraído por bicarbonato de sódio ( $\text{Po}_{\text{BIC}}$ ) é apresentado na tabela 11. Na camada superficial, para as fontes de P, o TSP ( $41,77 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi superior ao FNR e ao controle ( $12,47$  e  $12,61 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente). Na camada de 5-10 cm, o TSP apresentou  $19,73 \text{ mg kg}^{-1}$ , sobressaindo-se em relação ao FNR ( $12,84 \text{ mg kg}^{-1}$ ), além de ambas fontes diferirem do controle ( $4,68 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Na camada 10-20, observa-se a mesma dinâmica da camada superficial, o TSP ( $19,96 \text{ mg kg}^{-1}$ ) superior ao FNR ( $13,41 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e ao controle ( $15,56 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Para as doses de SH nota-se maiores teores médios de  $\text{Po}_{\text{BIC}}$  com 0,5 % de SH nas camadas 0-5 e 10-20 cm; já na camada 5-10 cm, maiores teores com 1 % de SH. Houve interação fonte P x dose SH nas camadas 0-5 e 10-20 cm. Ao analisar as médias do desdobramento, para o TSP, melhores teores foram encontrados com as doses de 2,0 e 0,5 % SH, já para o FNR, observou-se o inverso, maiores teores foram encontrados com as doses 0,5 e 2,0 % SH, respectivamente nas camadas 0-5 e 10-20 cm.

**Tabela 11.** Teor de P orgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído por bicarbonato de sódio ( $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	12,61 B
	TSP	38,15 <sup>(7)</sup>	41,73	36,13	51,05	41,77 A
	FNR	16,02 <sup>(8)</sup>	17,73	12,46	3,67	12,47 B
	Média	27,08 b	29,73 a	24,29 b	27,36 b	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	4,68 C
	TSP	22,32 <sup>ns</sup>	13,55	23,24	19,80	19,73 A
	FNR	10,21 <sup>ns</sup>	11,49	18,98	10,55	12,84 B
	Média	16,27 b	12,52 b	21,11 a	15,18 b	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	15,56 B
	TSP	21,79 <sup>(9)</sup>	31,67	18,71	18,38	19,96 A
	FNR	11,74 <sup>(10)</sup>	7,33	16,64	18,22	13,41 B
	Média	16,77 b	19,50 a	17,68 b	18,30 b	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5% pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(7)</sup>  $Y = 39,61 - 6,58x + 6,03x^2$  ( $r^2=0,80^*$ )

<sup>(8)</sup>  $Y = 16,63 + 0,72x - 1,65x^2$  ( $r^2=0,96^*$ )

<sup>(9)</sup>  $Y = 30,45 - 19,51x + 5,02x^2$  ( $r^2=0,92^*$ )

<sup>(10)</sup>  $Y = 10,20 + 1,87x + 1,20x^2$  ( $r^2=0,60^*$ )

De acordo com alguns autores, a influência da adubação fosfatada sobre a fração de Po extraída com  $\text{NaHCO}_3$  é pequena (YANG et al., 2012; BRUNETTO et al., 2013), porém, nota-se que as fontes de P diferiram-se nessa fração, sendo a fonte solúvel (TSP) superior a fonte reativa (FNR) independente das doses de SH empregadas. Segundo Gatiboni et al. (2007), essa fração  $\text{Po}_{\text{BIC}}$ , com decorrer do tempo, proporciona aumento de Po total no solo.

Seguindo as extrações, a próxima fração do fracionamento de P do solo, utiliza-se o extrator  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  do qual extrai o  $\text{Pi}$  e Po ligado aos óxidos de Fe e Al e aos

argilominerais com ligação intermediária de energia, ou seja, essa fração é considerada P moderadamente lábil devido ao efeito dos ânions  $\text{OH}^-$  liberados pelo extrator dissolvendo parte do P ligado a esses elementos (GATIBONI, 2003). Usualmente, as frações  $\text{Pi}_{\text{HID}0,1}$  e  $\text{Po}_{\text{HID}0,1}$  são as que mais contribuem para o P moderadamente lábil, corroborando com os resultados apresentados por Araújo e Salcedo (1997) e Tokura et al. (2002) ao detectarem a predominância do Po no compartimento considerado pouco disponível.

Nessa fração  $\text{Pi}_{\text{HID}0,1}$  houve efeito significativo para as fontes de P nas camadas de 0-5 e 10-20 cm (Tabela 12). Na camada superficial, o TSP ( $52,46 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi superior ao FNR ( $40,21 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e ambas fontes diferiram do controle ( $33,74 \text{ mg kg}^{-1}$ ), já para camada 10-20 cm, o TSP foi superior ao FNR e ao controle. Houve efeito das doses de SH e interação fonte P x dose SH apenas na camada de 0-5 cm, onde a ausência de SH correspondeu a maiores teores para o TSP, enquanto para o FNR, a dose 2,0 % SH mostrou-se superior.

Nota-se que essa fração apresenta valores superiores as frações anteriores ( $\text{Pi}_{\text{RTA}}$  e  $\text{Pi}_{\text{BIC}}$  e  $\text{Po}_{\text{BIC}}$ , ou seja, P lábil) provavelmente devido ao acúmulo de P por adubação e depósito de MO dos restos culturais, ocupando assim os sítios de adsorção do solo. Resultados semelhantes foram apresentados por Carneiro et al. (2011), estudando sucessão do feijoeiro com a braquiária, utilizando o SSP como fonte de P, onde os autores observaram maiores teores para a fontes solúvel comparado com o controle.

O TSP é prontamente solúvel para absorção das plantas, porém, ao reagir com o solo, este torna-se insolúvel devido a uma série de reações que ocorrem com os minerais no solo, sendo adsorvidos na superfície dos óxidos de Fe e Al (SYERS et al., 2008), explicando os altos teores de P apresentados nessa fração quando comparado as demais. Almeida e Rosolem (2016) ao adicionar fontes de P no solo, obtiveram aumento nos teores de  $\text{Pi}_{\text{HID}0,1}$  quando comparado a ausência de adubação (controle). Gonçalves e Meurer (2009) ao analisar frações de P no solo e sua relação com a absorção pelas plantas de arroz também observaram maiores teores de P promovidos por TSP para  $\text{Pi}_{\text{HID}0,1}$ , incrementando assim a fração moderadamente lábil, corroborando com os resultados obtidos.



**Tabela 12.** Teor de P inorgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído por hidróxido de sódio ( $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	33,74 C
	TSP	68,11 <sup>(11)</sup>	52,89	52,89	35,94	52,46 A
	FNR	38,29 <sup>(12)</sup>	42,69	35,62	44,26	40,21 B
	Média	53,20 a	47,79 b	44,26 b	40,10 b	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	36,09 A
	TSP	36,41 <sup>ns</sup>	36,41	38,45	36,56	36,96 A
	FNR	37,04 <sup>ns</sup>	33,27	41,43	37,82	37,39 A
	Média	36,73 a	34,84 a	39,94 a	37,19 a	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	32,80 B
	TSP	45,04 <sup>ns</sup>	41,27	37,51	36,25	40,02 A
	FNR	31,39 <sup>ns</sup>	37,98	34,37	33,58	34,33 B
	Média	38,22 a	39,62 a	35,94 a	34,92 a	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5% pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(11)</sup>  $Y = 66,40 - 18,92x + 1,98x^2$  ( $r^2=0,93^*$ )

<sup>(12)</sup>  $Y = 39,85 - 4,16x + 3,05x^2$  ( $r^2=0,37^*$ )

Os teores de  $P_o$  extraído por hidróxido de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{oHID0,1}$ ) são apresentados na tabela 13. As fontes de P e as doses SH influenciaram de forma significativa em todas as camadas analisadas. Na camada de 0-5 cm, as fontes de P diferiram-se entre si e entre o controle ( $27,68 \text{ mg kg}^{-1}$ ) onde o TSP ( $50,50 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi superior ao FNR ( $37,64 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Na camada 5-10 cm, houve superioridade do TSP com relação ao FNR, que não se diferiu do controle. Para as doses de SH, na camada superior, a maior dose de SH (2,0 %) apresentou maiores teores de  $P_{oHID0,1}$  enquanto para camada de 10-20 cm, a ausência de SH foi superior. Houve interação fonte P x dose SH nas camadas 0-5 e 10-20 cm; na camada superficial, as doses 1,0 e 2,0 % SH foram significativas para o TSP e para o FNR, respectivamente. Já na camada 10-20 cm, houve efeito nulo das SH para as duas fontes de P analisadas.

**Tabela 13.** Teor de P orgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído por hidróxido de sódio ( $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	27,68 C
	TSP	31,46 <sup>(13)</sup>	61,30	62,11	47,13	50,50 A
	FNR	41,53 <sup>(14)</sup>	29,83	25,53	53,69	37,64 B
	Média	36,50 b	45,57 b	43,82 b	50,41 a	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	27,49 B
	TSP	34,21 <sup>ns</sup>	30,67	50,03	41,36	39,07 A
	FNR	40,08 <sup>ns</sup>	24,63	42,17	24,41	32,82 B
	Média	37,15 b	27,65 b	46,10 a	32,89 b	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	26,73 A
	TSP	65,63 <sup>(15)</sup>	39,90	15,27	6,23	31,76 A
	FNR	37,61 <sup>(16)</sup>	17,49	24,62	26,21	26,48 A
	Média	51,62 a	28,70 b	19,95 b	16,22 b	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5% pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(13)</sup>  $Y = 33,38 + 58,58x - 26,01x^2$  ( $r^2=0,93^*$ )

<sup>(17)</sup>  $Y = 41,92 - 37,02x + 21,42x^2$  ( $r^2=0,99^*$ )

<sup>(15)</sup>  $Y = 66,64 - 68,35x + 18,99x^2$  ( $r^2=0,99^*$ )

<sup>(16)</sup>  $Y = 35,04 - 27,16x + 11,59x^2$  ( $r^2=0,61^*$ )

O HCl extrai as formas inorgânicas de P associadas ao Ca (CROSS; SCHLESINGER, 1995) sendo também considerada uma fração moderadamente lábil. Tal interação do P com Ca é esperada nos fertilizantes não acidulados, como os FNR, bem como há ocorrência natural nos minerais primários e secundários do solo (GATIBONI, 2003). Houve diferença nessa fração  $P_{iHCl}$  entre as fontes, as doses e interação fonte P x dose SH em todas as camadas analisadas (Tabela 14). Na camada de 0-5 cm, o TSP ( $4,48 \text{ mg kg}^{-1}$ ) sobressaiu-se sobre o FNR ( $1,35 \text{ mg kg}^{-1}$ ), que por sua vez não se diferiu do controle ( $1,40 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Isso pode ter ocorrido uma vez que nas camadas superficiais, a aplicação do fertilizante pode alcalinizar o solo durante a dissolução do grânulo, promovendo assim a reação do P – Ca (DEGRYSE et al., 2014). Nas demais camadas (5-10 e 10-20 cm), o FNR foi superior ao TSP, fato já esperado, devido a interação do mesmo com Ca. No geral, os valores foram bastante baixos na fração de  $P_{iHCl}$  quando comparado com as demais frações. Em seu estudo, Rodrigues (2014) relatou que a fração  $P_{iHCl}$  representa menos do que 2% do  $P_{TOTAL}$  dos solos. Corroborando com os dados apresentados por Gatiboni (2003) que relata os baixos valores esperados de  $P_{iHCl}$  devido ao colapso dos minerais primários com o nível de intemperismo do solo. Pavinato et al. (2009) assim com o Herrera et al. (2016) também encontraram baixos valores de  $P_{iHCl}$  quando comparado às demais frações de P. Desse modo, essa fração foi a que menos contribuiu para o P moderadamente lábil nos solos.

As doses de SH foram significativas nas três camadas analisadas para o  $P_{iHCl}$ , e responderam as doses 2,0; 0,0 e 0,5 % SH, respectivamente nas camadas. Ao analisar o

desdobramento da interação fonte P x dose SH, nota-se efeito semelhante para as fontes TSP e FNR, nas profundidades 0-5 e 10-20 cm, com as doses 2,0 e 0,5 % de SH, respectivamente. Para camada 5-10 cm, o FNR respondeu a dose de 2,0 % SH, enquanto o TSP respondeu melhor à ausência de SH.

**Tabela 14.** Teor de P inorgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído por ácido clorídrico ( $\text{HCl } 1,0 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	1,40 B
	TSP	1,90 <sup>(17)</sup>	0,82	3,24	11,95	4,48 A
	FNR	1,02 <sup>(18)</sup>	0,57	1,83	1,99	1,35 B
	Média	1,46 b	0,69 b	2,53 b	6,97 a	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	2,81 A
	TSP	2,10 <sup>(19)</sup>	0,73	0,36	0,29	0,87 B
	FNR	3,26 <sup>(20)</sup>	0,67	1,68	3,68	2,32 A
	Média	2,68 a	0,70 b	1,02 b	1,98 b	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	0,41 B
	TSP	0,22 <sup>(21)</sup>	0,62	0,60	0,49	0,48 B
	FNR	1,73 <sup>ns</sup>	10,85	1,51	2,94	4,26 A
	Média	0,97 b	5,73 a	1,05 b	1,71 b	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5 % pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(17)</sup>  $Y = 1,71 - 2,82x + 3,98x^2$  ( $r^2=0,99^*$ )

<sup>(18)</sup>  $Y = 0,82 + 0,58x + 0,02x^2$  ( $r^2=0,62^*$ )

<sup>(19)</sup>  $Y = 2,03 - 2,73x + 0,94x^2$  ( $r^2=0,98^*$ )

<sup>(20)</sup>  $Y = 2,97 - 4,16x + 2,28x^2$  ( $r^2=0,82^*$ )

<sup>(21)</sup>  $Y = 0,25 + 0,72x - 0,30x^2$  ( $r^2=0,87^*$ )

Na sequência das extrações tem-se o  $P_i$  extraído por hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , que se refere ao P ligado aos hidróxidos e argilominerais com alta energia de ligação (CROSS, SCHLESINGER, 1995). De acordo com Pavinato, Dao e Rosolem (2010), essa fração comporta-se como dreno de P do solo, uma vez que o mesmo estaria ligado aos grupos OH<sup>-</sup> da superfície dos argilominerais e teriam alta capacidade de sorção, sendo adsorvidos em alta quantidade, sobretudo em solos do Cerrado. As fontes de P, doses de SH e a interação fonte P x dose SH foram significativas apenas na camada 0-5 cm onde o TSP ( $39,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi superior ao FNR ( $30,64 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e ao controle ( $23,60 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Nota-se que o TSP foi superior ao FNR nesta fração, independente da dose de SH empregada. Para interação, ao analisar o desdobramento das médias, o TSP respondeu a dose 1,0 % SH enquanto o FNR a dose de 2,0 % SH (Tabela 15). Rodrigues (2014) ao estudar a dinâmica das formas de P em diferentes sistemas de manejo, verificou que os valores de  $P_{iHID0,5}$  eram maiores nas camadas superficiais do solo, corroborando com os resultados apresentados no presente trabalho.

**Tabela 15.** Teor de P inorgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído por hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (NaOH  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	23,60 B
	TSP	41,64 <sup>(22)</sup>	24,15	62,88	26,93	39,90 A
	FNR	33,31 <sup>(23)</sup>	26,93	28,04	34,28	23,60 B
	Média	37,48 b	25,54 b	45,46 a	30,61 b	
5-10 cm	Controle	-	-	-	-	17,07 A
	TSP	14,98 <sup>ns</sup>	19,71	22,07	16,38	18,29 A
	FNR	24,98 <sup>ns</sup>	16,79	19,15	22,62	20,89 A
	Média	19,98 a	18,25 a	20,61 a	19,50 a	
10- 20 cm	Controle	-	-	-	-	19,81 A
	TSP	18,05 <sup>ns</sup>	16,10	19,85	25,25	19,81 A
	FNR	21,38 <sup>ns</sup>	23,74	18,32	20,96	21,10 A
	Média	19,72 a	19,92 a	19,08 a	23,11 a	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5% pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(22)</sup>  $Y = 33,95 + 29,32x - 15,77x^2$  ( $r^2=0,23^*$ )

<sup>(23)</sup>  $Y = 32,81 - 12,37x + 6,59x^2$  ( $r^2=0,92^*$ )

Os valores de  $\text{Po}_{\text{HID } 0,5}$  são apresentados na tabela 16, essa fração é caracterizada como orgânica de alta estabilidade no solo. O FNR mostrou-se superior quanto ao  $\text{Po}_{\text{HID } 0,5}$  em todas as camadas, diferindo-se do TSP e do controle, independente da dose de SH aplicada. Em contrapartida, o TSP não se diferiu do controle em nenhuma profundidade para essa fração. Apenas na camada 0-5 cm nota-se efeito das doses de SH, com maiores teores de  $\text{Po}_{\text{HID } 0,5}$  encontrados com a dose de 2 % SH. Não houve efeito significativo para interação fonte de P x doses SH em nenhuma camada analisada.

**Tabela 16.** Teor de P orgânico ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) extraído por hidróxido de sódio ( $\text{NaOH } 0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	14,02 B
	TSP	15,72 <sup>ns</sup>	15,08	52,66	43,15	31,65 B
	FNR	82,49 <sup>ns</sup>	49,11	80,74	91,81	76,04 A
	Média	49,10 b	32,09 b	66,70 b	67,48 a	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	14,32 B
	TSP	12,88 <sup>ns</sup>	22,23	11,48	10,41	14,25 B
	FNR	71,61 <sup>ns</sup>	15,40	15,48	20,40	30,72 A
	Média	42,24 a	18,82 a	13,48 a	15,40 a	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	9,59 B
	TSP	12,26 <sup>ns</sup>	14,75	15,06	13,43	13,88 B
	FNR	44,92 <sup>ns</sup>	46,62	27,14	18,28	34,24 A
	Média	28,59 a	30,68 a	21,10 a	15,86 a	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, <sup>ns</sup> não significativo

A biodisponibilidade de frações de P em solos submetidos a um sistema de semeadura direta foi estudada por Gatiboni et al. (2007), em que os autores observaram a tendência de incrementos no  $P_i$  e decréscimo de  $P_o$  com o passar dos anos de cultivo nos solos, contradizendo o apresentado no presente trabalho, uma vez que para o FNR, o  $P_{oHID0,5}$  ( $77,12 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foi superior ao  $P_{iHID0,5}$  ( $30,64 \text{ mg kg}^{-1}$ ) na camada de 0-5cm.

De modo geral, a mobilidade do  $P_i$  na solução do solo é considerada baixa, mas com a mineralização dos resíduos orgânicos deixados em superfície, promove uma liberação e remanejamento das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos suscetíveis à adsorção que as formas inorgânicas (ANGHINONI, 2007).

#### 4.3.2. Fósforo residual e fósforo total

O  $P_{RESIDUAL}$  compreende o  $P_i$  retido nos minerais; hematita, goethita e gibbsita e o  $P_o$  estável, não extraído pelos extratores no fracionamento sequencial P. O  $P_{RESIDUAL}$  mostrou-se significativo para as fontes de P e doses de SH na camada superficial onde o TSP ( $160,52 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e o FNR ( $177,02 \text{ mg kg}^{-1}$ ) diferiram do controle (Tabela 17). Nas demais camadas, não houve diferença entre as fontes de P e o controle. Corroborando os dados apresentados por Gatiboni et al. (2007), essa fração contribuiu com a maior proporção de P nos solos. Por ser uma fração não acessível aos extratores químicos seletivos usados nos esquemas de fracionamento, pode dizer que o  $P_{RESIDUAL}$  pode oferecer P para as plantas apenas em situações de extrema carência nos solos (GATIBONI et al., 2005).

**Tabela 17.** Teor de P residual ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	127,68 B
	TSP	152,13 <sup>ns</sup>	136,24	168,01	185,73	160,53 A
	FNR	169,23 <sup>ns</sup>	156,40	169,84	212,61	177,02 A
	Média	160,68 b	146,32 b	168,93 b	199,17 a	
5-10 cm	Controle	-	-	-	-	134,41 A
	TSP	141,74 <sup>ns</sup>	149,68	155,79	147,24	148,61 A
	FNR	156,40 <sup>ns</sup>	147,24	157,02	154,41	153,77 A
	Média	149,07 a	148,46 a	156,41 a	150,83 a	
10- 20 cm	Controle	-	-	-	-	152,13 A
	TSP	154,57 <sup>ns</sup>	169,84	154,57	146,62	156,40 A
	FNR	137,46 <sup>ns</sup>	168,01	149,07	160,07	153,65 A
	Média	146,02 a	168,93 a	151,82 a	153,35 a	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, <sup>ns</sup> não significativo

O  $P_{\text{TOTAL}}$  apresentado aqui compreende o somatório de todas as frações de P descritas acima. Com relação as fontes, como já era esperado, o TSP foi superior ao FNR e ao controle em relação ao  $P_{\text{TOTAL}}$ , isso para a camada superficial. Nas demais camadas, não houve diferenças entre as fontes de P (Tabela 18).

As SH podem promover aumento significativo de  $P_{\text{TOTAL}}$  nos solos, sendo a dose 2% SH significativa na camada superficial. Para camada 10-20 cm, houve interação fonte P x dose SH, e ao analisar o desdobramento das médias, nota-se que a dose 0,5 % SH para o FNR foi mais responsiva.

**Tabela 18.** Teor de P total ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) nas três camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para o desdobramento das quatro doses de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR).

Camada	Fonte P	Dose de SH (%)				Média
		0	0,5	1,0	2,0	
0 – 5 cm	Controle	-	-	-	-	251,58 B
	TSP	431,58 <sup>ns</sup>	387,39	540,07	491,76	467,03 A
	FNR	402,96 <sup>ns</sup>	345,37	374,54	469,56	399,18 A
	Média	417,27 b	366,38 b	457,30 b	480,66 a	
5 – 10 cm	Controle	-	-	-	-	250,19 A
	TSP	295,22 <sup>ns</sup>	308,75	327,55	295,68	307,20 A
	FNR	362,43 <sup>ns</sup>	263,51	314,72	279,44	304,14 A
	Média	328,83 a	286,13 a	321,14 a	287,56 a	
10 – 20 cm	Controle	-	-	-	-	279,93 A
	TSP	355,04 <sup>(24)</sup>	319,33	283,66	258,17	304,79 A
	FNR	298,10 <sup>(25)</sup>	327,39	291,09	293,41	302,50 A
	Média	326,57 a	323,36 b	287,38 b	275,79 b	

Médias seguidas de letras iguais, na linha (minúscula) e na coluna (maiúscula), não diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %, \* significativo a 5% pelo teste F, <sup>ns</sup> não significativo

<sup>(24)</sup>  $Y = 357,18 - 90,43x + 20,38x^2$  ( $r^2=0,99^*$ )

<sup>(25)</sup>  $Y = 305,51 + 8,09x - 7,69x^2$  ( $r^2=0,21^*$ )

#### 4.3.3. Compartimento de fósforo segundo a labilidade

Gatiboni (2003) sugeriu a organização das frações de P de acordo com a labilidade. Entende-se por labilidade como as formas das forças de extração proporcional ao potencial de retenção de P no solo, ou seja, partindo de frações mais solúveis para frações menos solúveis. O P lábil corresponde as frações de  $P_i$  extraído pela resina (RTA) e as frações de  $P_i$  e  $P_o$  extraída pelo bicarbonato de sódio ( $P_{iBIC}$  e  $P_{oBIC}$ ). O P moderadamente lábil é composto por  $P_i$  e  $P_o$  extraído por hidróxido de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{iHID 0,1}$  e  $P_{oHID 0,1}$ ) e o  $P_i$  extraído por ácido clorídrico ( $P_{iHCl}$ ). Já o P não lábil corresponde ao somatório das frações de  $P_i$  e  $P_o$  extraído por hidróxido de sódio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{iHID 0,5}$  e  $P_{oHID 0,5}$ ) juntamente com o  $P_{RESIDUAL}$ .

As frações de P foram agrupadas de acordo com a labilidade descrita acima e são apresentadas na tabela 19. Para as fontes de P, o acúmulo de formas lábeis de P no solo foi significativo em todas as camadas analisadas, onde o TSP, por ser mais solúvel que o FNR, apresentou maiores valores. Já para o P moderadamente lábil e o P não lábil, apenas na camada superficial houve diferenças entre as fontes de P. Não houve efeito, em nenhuma camada analisada, para as doses de SH.

As formas lábeis de P foram superiores nas camadas superficiais, e decresceram em camadas mais profundas, corroborando o observado por Tokura et al. (2002). Já para as formas moderadamente lábeis de P no solo, o presente trabalho difere do encontrado nos

trabalhos de Santos et al. (2008) e Gonçalves e Meurer (2009), cujos autores encontram maiores teores nesta fração.

**Tabela 19.** Agrupamento das frações de P de acordo com a labilidade nas camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm) para a média das quatro doses médias de substâncias húmicas (SH) 0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante e as duas fontes fosfatadas (TSP e FNR)

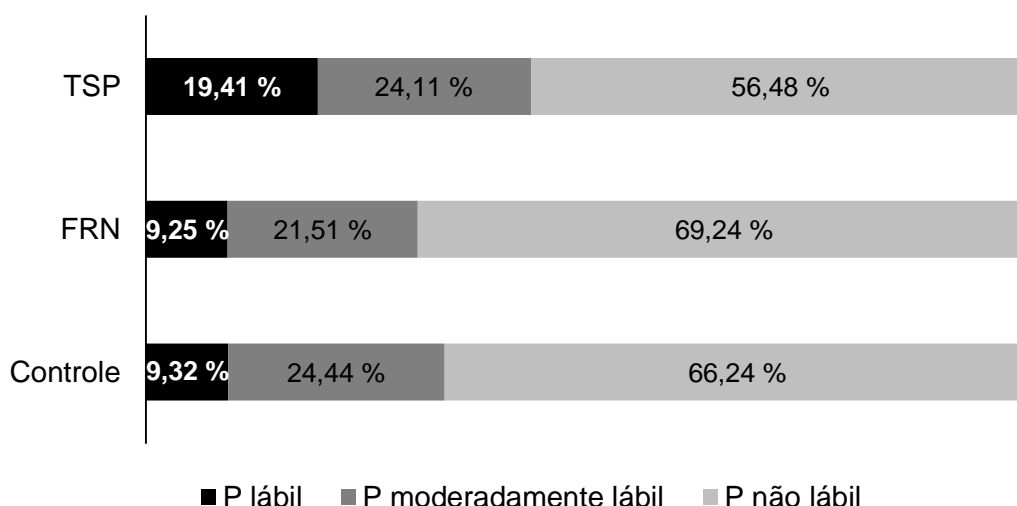
Camada	Fonte P	Labilidade		
		P lábil	P moderadamente lábil	P não lábil
0 – 5 cm	Controle	23,45 B	62,82 B	165,30 B
	TSP	124,18 A	107,44 A	284,78 A
	FRN	35,20 B	79,20 B	165,80 B
	Média	60,94	83,15	205,29
5 – 10 cm	Controle	18,00 B	66,39 <sup>ns</sup>	165,80 <sup>ns</sup>
	TSP	48,94 A	77,32 <sup>ns</sup>	181,56 <sup>ns</sup>
	FRN	29,36 B	71,91 <sup>ns</sup>	202,25 <sup>ns</sup>
	Média	32,10	71,87	183,20
10 – 20 cm	Controle	30,69 <sup>ns</sup>	59,94 <sup>ns</sup>	186,56 <sup>ns</sup>
	TSP	38,71 <sup>ns</sup>	78,25 <sup>ns</sup>	193,47 <sup>ns</sup>
	FRN	34,99 <sup>ns</sup>	61,29 <sup>ns</sup>	211,75 <sup>ns</sup>
	Média	34,80	66,49	197,26

Médias seguidas de letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5%, <sup>ns</sup> não significativo

As distribuições relativas das frações de labilidade em relação ao P total são apresentadas na figura 3. O TSP apresentou 19,41 % de P lábil, em contrapartida, as frações moderadamente lábil e não lábil somam mais de 80 % presente no solo. Isso pode ser explicado uma vez que a fonte, por ser mais solúvel, disponibiliza mais P ao solo. No entanto, o FNR assim como o controle, nota-se que menos de 10 % do P encontrado no solo é considerado lábil. A disponibilidade de P do FNR é esperada a longo prazo, uma vez que essa fonte, por não ser acidulada, não disponibiliza prontamente o P para as plantas.

De maneira geral, sobre os dados do fracionamento de P no solo, salienta-se que houve acúmulo de frações lábeis de P nas camadas mais superficiais com o uso de TSP, sendo que o FNR não foi efetivo para manter altos teores de P lábil no solo. Também se destaca que o uso de SH, independente da dose, não foi efetivo na alteração da disponibilidade de P no solo quando avaliado o residual remanescente após dois cultivos sucessivos da soja e do milho.





**Figura 3.** Distribuição relativa das frações de labilidade em relação ao P total na avaliação de duas fontes de P (TSP e FRN) e quatro doses médias acumuladas de substâncias húmicas (0; 0,5; 1,0 e 2,0 % SH) na média das camadas de solo (0-5, 5-10 e 10-20 cm).

#### 4.4. Produtividade das culturas

O teor adequado de P tanto para cultura da soja quanto para a cultura do milho nos estágios iniciais de desenvolvimento é essencial para incrementos na produtividade (FANCELLI, 2010). Apesar das condições de temperatura estarem na faixa adequada para as culturas, de 24 a 30 °C (CRUZ et al., 2010), a produtividade esperada não foi obtida, provavelmente devido à baixa precipitação pluvial em alguns momentos do desenvolvimento da cultura. Outro fator que certamente afetou foi que a área é recente de abertura do Cerrado e com semeadura direta, ocorre dessa forma menor aporte de MOS e menor estabilidade do sistema. Há concordância de que os fosfatos mais solúveis proporcionam maior resposta no ano da aplicação, enquanto os fosfatos naturais têm menor eficiência inicial, alcançando assim resultados em longo prazo (HOROWITZ e MEURER, 2004) como o observado nesse trabalho.

Os resultados de produtividade de grãos da soja indicam que a associação do TSP com 0,5% de substâncias húmicas foi superior para essa cultura (2646 kg ha<sup>-1</sup>) na primeira safra avaliada, embora sendo semelhante às demais doses de SH (Tabela 20 e Figura 4) ou seja, não houve efeito das doses de SH. Para cultura do milho, o TSP foi superior ao FNR e ao controle, independente da dose de SH utilizada. Conforme já destacado anteriormente, as médias de produtividade tanto da soja como do milho foram inferiores ao esperado, pois se estimavam produtividades acima de 3 e 5 t ha<sup>-1</sup> para a soja e o milho, respectivamente.

Oliveira (2011) observou maiores produtividades da soja na aplicação a lanço do FNR em relação à aplicação no sulco de semeadura, onde comprovaram a necessidade de

contato entre o solo e a rocha fosfática, de modo a aumentar a taxa de dissolução da rocha disponibilizando P suficientes para as plantas; diferindo dos resultados apresentados nesse trabalho, pois no nosso caso foi aplicado o FNR na linha de semeadura. Já para cultura do milho, Resende et al. (2006) obtiveram maior produtividade de grãos com a aplicação do FNR de Arad parcelado no sulco de semeadura. Os autores explicam que o FNR disponibilizou de maneira lenta e gradual o P no solo, suprindo assim as exigências da cultura.

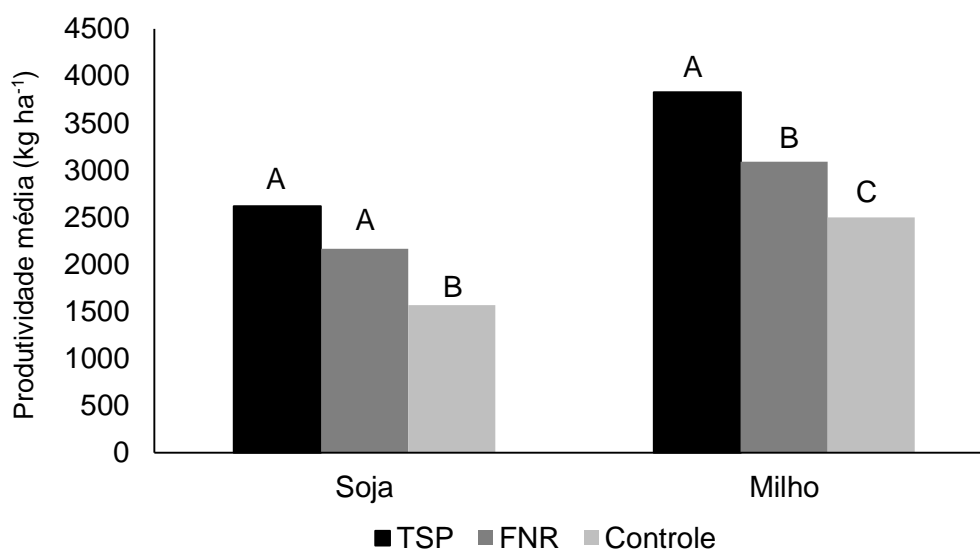
Devido à alta solubilidade do TSP, observa-se, em curto prazo, seu melhor desempenho quando comparado com o FNR; o mesmo comportamento foi relatado por vários autores em outros trabalhos. Araújo et al. (2003) ao avaliar fontes de P, constataram que a maior produção de milho foi obtida com fertilizante mais solúvel, observando que o FN (Araxá) obteve o pior desempenho. Corrêa et al. (2005), avaliando FN Gafsa e TSP com relação a absorção de P, relataram que o TSP aumentou a absorção de P nas plantas, enquanto o Gafsa aumentou a quantidade de P extraída pela cultura do milho. Resende et al. (2006), estudando fontes e modos de aplicação para o milho em solo de Cerrado, constataram que as fontes solúveis propiciam desempenho melhor do que o FNR. Harger et al. (2007) concluiu em seu estudo que o TSP foi a fonte de P com maior eficiência, de modo que garantiu melhor nutrição para as plantas de milho.

Para os efeitos das SHs na produção, ao comparar a fonte FNR (Arad) com o TSP, Matias (2010) demonstrou que a adição de SH aumentou a disponibilidade de P, e o aumento da eficiência agrônômica relativa para cultura do milho, contradizendo os resultados obtidos no presente trabalho.

**Tabela 20.** Produtividade média de grãos das culturas da soja primeira safra e do milho segunda safra considerando as quatro doses de substâncias húmicas aplicadas e média das fontes fosfatadas (TSP e FNR). Querência – MT, Safra 2016/17.

Doses de SH (%)	Produtividade Soja	Produtividade Milho
	----- ( kg ha <sup>-1</sup> ) -----	
0	2347 <sup>ns</sup>	3415 <sup>ns</sup>
0,5	2646	3544
1,0	2366	3384
2,0	2192	3476
Média geral	2296	3349
C.V. (%)	14,98	9,57

<sup>ns</sup> não significativo a 5 % pelo teste F



**Figura 4.** Produtividade média de grãos da soja e do milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) na avaliação de duas fontes fosfatadas (TSP e FNR) e média das quatro doses de substâncias húmicas (0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante). Querência – MT, Safra 2016/17.

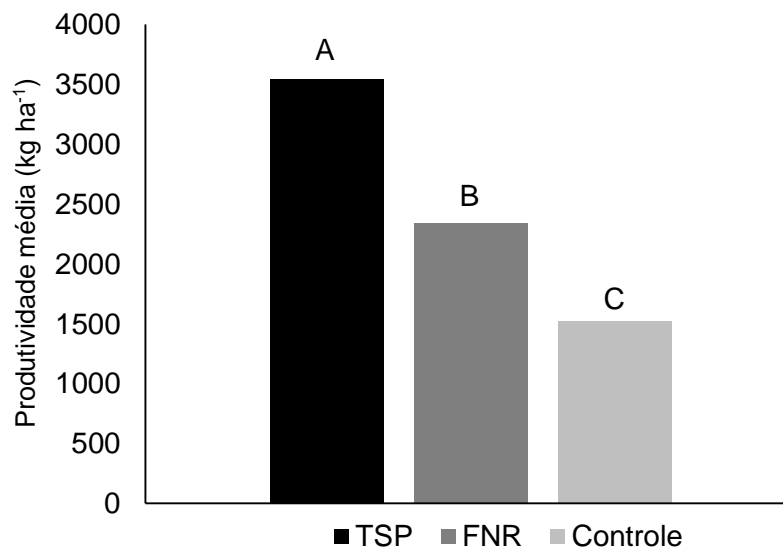
Médias seguidas de letras distintas para cada cultura diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %

Os dados de produtividade média para a cultura da soja na safra 2017/18 são apresentados na tabela 21 e na figura 5. As fontes de P foram significativas, diferindo-se entre si e entre o controle, não houve efeito significativo da dose de SH e também não houve interação fonte de P x dose de SH. A utilização da fonte de TSP ( $3599 \text{ kg ha}^{-1}$ ) mostrou-se superior ao FNR ( $2333 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Ao compararmos com a safra anterior (2016/17) observa-se que houve o efeito da adubação fosfatada, incrementando a produção, e como já seria o esperado, a fonte solúvel foi superior à fonte reativa. No somatório das três culturas, nas duas safras, para as fontes de P houve incremento de 79 % com a aplicação do TSP em relação ao controle e de 36 % com aplicação do FNR em relação ao controle.

**Tabela 21.** Produtividade média de grãos das culturas da soja primeira safra e do milho segunda safra considerando as quatro doses de substâncias húmicas aplicadas e média das fontes fosfatadas (TSP e FNR). Querência – MT, Safra 2017/18.

Doses de SH (%)	Produtividade Soja ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
0	2770 <sup>ns</sup>
0,5	3022
1,0	2957
2,0	2995
Média geral	2779
C.V. (%)	13,06

<sup>ns</sup> não significativo a 5 % pelo teste F



**Figura 5.** Produtividade média de grãos da soja (kg ha<sup>-1</sup>) sob duas fontes fosfatadas (TSP e FNR) e média das quatro doses de substâncias húmicas (0; 0,5; 1,0 e 2,0 % do volume de fertilizante) para cultura da soja primeira safra. Safra 2017/18. Querência – MT, Brasil.

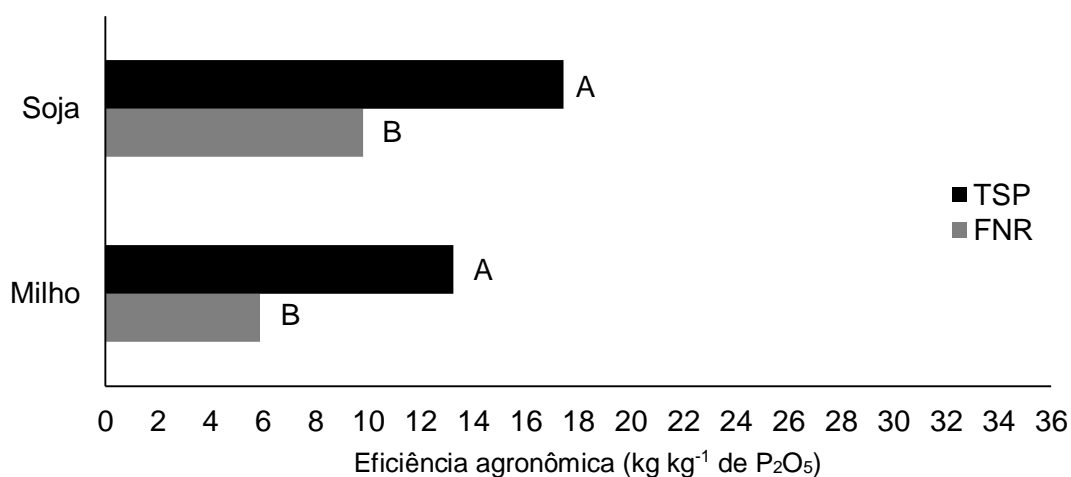
Médias seguidas de letras distintas para cada fonte de P diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %

De modo geral, a fonte solúvel TSP foi bem superior que o FNR na produtividade das culturas, nos dois anos agrícolas, o que já se esperava como resposta de curto prazo. Em longo prazo, espera-se notar o efeito residual do FNR incrementando a produtividade das culturas, mas somente saberemos com avaliações de longo prazo.

#### 4.5. Eficiência agrônômica

Os dados de eficiência agrônômica das culturas da soja e do milho na safra 2016/17 são apresentados na figura 6. O TSP foi mais eficiente que o FNR para ambas as culturas, sendo 56,3% superior ao FNR para cultura da soja e 44,7% para cultura do milho. Da mesma forma, Garcia (2014) analisando fontes de P na cultura do milho em casa de vegetação, reportou que fonte solúvel apresenta melhores resultados de eficiência agrônômica quando comparado com demais fontes de P.

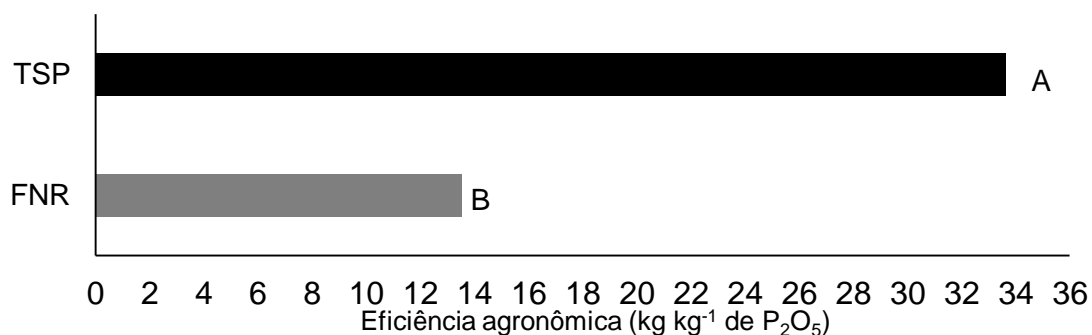
Por outro lado, Ono et al. (2009) avaliando a eficiência agrônômica do TSP e FNR (Arad) em cultivo de sucessão de soja com milho observaram que, independente da fonte de P, as culturas responderam bem a adubação fosfatada. Já Korndörfer et al. (1999) mencionam que a eficiência agrônômica de FNR foi superior à do TSP, cerca de 60,8 a 97% (de acordo com as fontes de FNR utilizadas pelos autores, sendo elas FNR Arad, FNR Marrocos e FNR Gafsa). Esses autores ainda apresentam que, com o passar do tempo, os FNR promoveram melhores resultados sobre eficiência agrônômica com relação do TSP.



**Figura 6.** Eficiência agrônômica (kg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado) das culturas da soja primeira safra e milho segunda safra de acordo com duas fontes de P (TSP e FNR) e média das doses de SH. Safra 2016/17. Querência –MT, Brasil.

Médias seguidas de letras distintas para cada cultura diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %

A eficiência agrônômica para a soja na safra 2017/18 também foi superior para o TSP em relação ao FNR (Figura 7), com uma diferença entre as fontes bastante substancial entre elas. No entanto, conforme já mencionado, espera-se que a eficiência agrônômica do FNR aumente gradualmente com o passar dos ciclos, uma vez que essa fonte proporciona efeitos residuais no solo (NOVAIS e SMYTH, 1999; RESENDE et al., 2006; SANTOS et al., 2008; ONO et al., 2009). Ao compararmos as duas safras de soja, a eficiência agrônômica foi crescente; a safra 2016/17 apresentou 17,43 kg grãos kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado para o TSP e 9,80 kg grãos kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado para o FNR enquanto que na safra 2017/18 apresentou 33,63 kg grãos kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado para o TSP e 13,53 kg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado para o FNR.



**Figura 7.** Eficiência agrônômica (kg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicado) da cultura da soja primeira safra de acordo com duas fontes de P (TSP e FNR) e média das doses de SH. Safra 2017/18. Querência –MT, Brasil.

Médias seguidas de letras distintas para cada fonte de P diferem entre si pelo teste de Tukey, em nível de 5 %.

## 5. CONCLUSÃO

A produtividade das culturas da soja e do milho foi amplamente influenciada pelas fontes fosfatadas, com superioridade do TSP em comparação ao FNR. O uso de substâncias húmicas nos fertilizantes não refletiu em maior produtividade das culturas, para ambas as fontes fosfatadas. As substâncias húmicas também não influenciaram na eficiência agrônômica do TSP e FNR, independente da dose testada no presente trabalho.

Quanto ao residual de P no solo, houve acúmulo de frações lábeis nas camadas mais superficiais com o uso de TSP, sendo que o FNR não foi efetivo para manter teores mais elevados de P lábil no solo. O uso de substâncias húmicas, independente da dose, não foi efetivo na alteração da disponibilidade de P no solo quando avaliado o residual remanescente após dois cultivos sucessivos, embora tenha alterado pontualmente os teores em algumas frações.

A continuação por mais ciclos de cultivo, poderá trazer informações mais precisas a respeito do potencial de utilização do residual de P no solo com uso de substâncias húmicas.



## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, G.A.S.C.; AZAMBUJA, R.S.L.; LINS, F.A.F. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Centro de Tecnologia Mineral – Ministério da Ciência e Tecnologia, 2005.
- ALMEIDA, D.S.; ROSOLEM, C.A. Ruzigrass grown in rotation with soybean increases soil labile phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, n. 6, p. 2444-2452, 2016.
- ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor do solo, formas do fósforo e adsorção de fosfato em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 985- 1002, 2003.
- ALVIM, K. R. T.; BRITO, C. H.; BRANDÃO, A. M.; GOMES, L. S.; LOPES, M. T. G. Redução da área foliar em plantas de milho na fase reprodutiva. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n.4, p. 413-418, 2011.
- ANDA. **Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2018.
- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adição de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 1003-1011, 2003.
- ANGHINONI, I. **Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F. de; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.873-928, 2007.
- ANTELO, J; ARCE, F.; AVENA, M.; FIOL, S.; LÓPEZ, R.; MARCÍAS,F. Adsorption of a soil humic acid at the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate. **Geoderma**, Amsterdam, v. 138, n. 1, p. 12-19, 2007.



ARAÚJO, E.A.; LANI, J.L; AMARAL, E.F.; GUERRA, A. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo Amarelo Distrófico na Amazônia ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 307-315, 2004.

ARAÚJO, I.B.; RESENDE, A.V.; FURTINI NETO, A.E.; ALVES, V.M.C. & SANTOS, J.Z.L. Eficiência nutricional do milho em resposta a fontes e modos de aplicação de fósforo. **Revista Ceres**, Viçosa, n. 50, p. 27-39, 2003.

ARAÚJO, M.S.; SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 643-650, 1997.

BALDOTTO, M. A.; GOBO, A. A. R.; SALOMÃO, M. S. M. B.; REZENDE, C. E. & CAMARGO, P. B. Frações da matéria orgânica e propriedades redox de substâncias húmicas em sedimentos de oceanos profundos. **Química Nova**, online, v. 36, n. 9, p. 1288-1295, 2013.

BARROW, N. J. Reaction of Anions and Cations with Variable-Charge Soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 183–230, 1986.

BHATTI, J.S.; COMERFORD, N.B.; JOHNSTON, C.T. Influence of oxalate and soil organic matter on sorption and desorption of phosphate onto a Spodic horizon. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 62, p. 1089-1095, 1998.

BASAMBA, T. A., BARRIOS, E., AMEZQUITA, E., RAO, I. M., SINGH, B. R. Tillage effects on maize yield in a Colombian savanna oxisol: Soil organic matter and P fractions. **Soil & Tillage Research**, Olshausenstr, v. 91, p. 131-142, 2006.

BOUYOCOS, G.J. Estimation of the colloidal material in soils. **Soil Science**, CIDADE, v. 64, p. 362-364, 1926.

BRUNETTO, G.; LORENSINI, F.; CERETTA, C.A.; GATIBONI, L.C.; TRENTIN, G.; GIROTTI, E.; MELO, G.W. Soil Phosphorus Fractions in a Sandy Typic Hapludalf as Affected by Phosphorus Fertilization and Grapevine Cultivation Period. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 44, n. 13, p. 1937- 1950, 2013.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. VAN; CAMARGO, C.E.O. Cereais. **Recomendações de calagem e adubação para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1997, 285 p. (Boletim técnico, 100).

CARNEIRO, L. F.; DE RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; SANTOS, J. Z.; CURTI, N.; REIS, T. H.; DO VALLE, L. A. Frações de fósforo no solo em resposta a adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 483-491, 2011.

CESSA, R. M. A. C.; CELI, L.; VITORINO, A. C. T.; NOVELINO, J. O.; BARBERIS, E. Adsorção de fósforo em frações argila na presença de ácido fúlvico, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 1535-1542, 2010.

CEKINSKI, E. Fertilizantes Fosfatados. In: CEKINSKI, E.; CALMONOVICI, C. E.; BICHARA, J. M.; FABIANI, M.; GIULIETTI, M.; CASTRO, M. L. M. M.; SILVEIRA, P. B. M.; PRESSIONOTTI, Q. S. H. C.; GUARDANI, R. (Ed.). **Tecnologia de Produção de Fertilizantes**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 95–129.

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

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

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2018/2019: quarto levantamento: janeiro/2019**. Brasília, DF, 2019. Disponível em <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2019.

CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v. 36, p. 199-207, 1985.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, W. A.; SOUZA, S. K. S.; FREIRE, F. J. e SILVA, G. B. Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and Puptake by corn. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 159-164, 2005.

COUTINHO, E.L.M.; NATALE, W.; VILLA NOVA, A.S.; SITTA, D.S.X. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados para a cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 9, p. 1393-1399, 1991.

CROSS, A. F; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: application to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural Ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 3/4, p. 197-214, 1995.

CRUZ, J. C., FILHO, I. A. P., ALVARENGA, R. C., NETO, M. G., VIANA, J. H. M, OLIVEIRA, M. F., MATRANGOLO, W. J. R., FILHO, M. R. A., **Cultivo do Milho**. Embrapa milho e sorgo. Sistemas de produção, 2 – 6ª Edição, 2010.

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

DEGRYSE, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Phosphorus Diffusion from Fertilizer: Visualization, Chemical Measurements, and Modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 78, p. 832-842, 2014.

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

ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J. C.; GARCIA-MINA, J. M. Organic Complexed Superphosphates (CSP): Physicochemical characterization and agronomical properties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 60, p. 2008–2017, 2012.

FANCELLI, A. L. Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes na cultura de milho. 2010. IPNI, International Plant Nutrition Institute – **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 131 – Setembro/2010.

FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina**. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura, 420 p., 1994.

FONSECA, D.S. **Fosfato no Brasil: Geologia, Reservas, Produção, Perspectivas, Entraves, Ações do DNPM**. Apresentação feita no XLIV Congresso de Geologia. 2010.

FREITAS, I. F.; NOVAIS, R. F.; VILLANI, E. M. A.; NOVAIS, S. V. Phosphorus extracted by ion Exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with diferente phosphorus rates and sources for varied soil- source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n.3, p. 667-677, 2013.

FU, Z.; Fengchang, W.; SONG, K.; LIN, Y.; BAI, Y.; ZHU, Y., GIESY, J. P. Competitive interaction between soil-derived humic acid and phosphate on goethite. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 36, n.4, p. 125-131, 2013.

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

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

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

GATIBONI, L.C.; RHEINHEIMER, D. dos S.; FLORES, A.F.C.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J.; LIMA, M.A.S. de. Phosphorus forms and availability assessed by <sup>31</sup>P-NMR in successively cropped soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 36, p. 2625-2640, 2005.

GEELHOED, J.; VAN, RIEMSDIJK, W.; FINDENEGG, G. Simulation of the effects of citrate exudation from roots on the plant availability of phosphate adsorbed on goethite. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 50, n. 3, p. 379-390, 1999.

GERKE, J. Kinetics of soil phosphate desorption as affected by citric acid. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, v. 157, p. 17-22, 1994.

GIKONYO, E. W.; ZAHARAH, A. R.; HANAFI, M.; A.R, A. Evaluation of residual values of different fertilizers at various rates used in phosphorus recapitalisation of an acid tropical soil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Hoboken, v. 166, p. 2302–2310, 2006.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G. **Uso eficiente de fertilizantes fosfatados**. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Brasília, p. 255-290, 1984.

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

GONÇALVES, J. S.; FERREIRA, C. R. R. P. T.; SOUZA, S. A. M. Produção nacional de fertilizantes, processo de desconcentração regional e maior dependência externa. **Informações Econômicas IEA**, v.38, n.8, ago, 2008.

GULLO, S.D. **Histórico e justificativas do uso de fosfato orgânico de Arad e fórmulas NPK ourofós na agricultura**. ADDUBARE, ano. I, n.3, p.7, 2002.

GUO, H. C.; ZHANG, Q. C.; WANG, G. H.; CHIENS, S. H. Phosphorus fractions of soils treated with phosphate rock and monocalcium phosphate after ryegrass growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 42, p.93-99, 2011.

GUPPY, C. N.; MENZIES, N. W.; MOODY, P. W.; BLAMEY, F. P. C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.43, p.189-202, 2005.

HARGER, N.; BRITO, O.R.; RALISCH, R.; ORTIZ, F.R.; WATANABE, T.S. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 39-44, 2007.

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers: An introduction to nutrient management**. 8. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, p. 516, 2013.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

HERRERA, B., FERNEY, W., RODRIGUES, M., BETTONI Teles, A. P., BARTH, G., & PAVINATO, P. S. Crop yields and soil phosphorus lability under soluble and humic-complexed phosphate fertilizers. **Agronomy Journal**, Madison, v. 108, n. 4, p. 1692- 1702, 2016.

HOROWITZ, N., MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, p. 665-682, 2004.

HU, H. Q.; HE, J. Z. LI, X. Y. LIU, F. Effect of several organic acids on phosphate Adsorption by Variable charges soils of central China. **Environment International**, New York, v. 26, n. 5, p. 353-358, 2001.

HUNT, J. F.; OHNO, T.; HE, Z.; HONEYCUTT, C. W.; DAIL, D. B. Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite and kaolin by fresh and decomposed organic matter. **Biology & Fertility of Soils**, Berlin, v. 44, p. 277-288, 2007.

ITA PROJETOS DE ENGENHARIA LTDA. **Estudo Preliminar sobre o Mercado de Fosfato**. Maio, p. 47, 2008.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 159-206, 1978.

KIRK, G.J.D.; SANTOS, E.E.; SANTOS, M.B. Phosphate solubilization by organic anion excretion from rice growing in aerobic soil: Rates of excretion and decomposition, effects on rhizosphere pH and effects on phosphate solubility and uptake. **New Phytologist**, Hoboken, v. 142, p. 185-200, 2000.

KLIEMANN, H.J.; LIMA, D.V. Eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, n. 2, p. 111-119, 2001.

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

KPOMBLEKOU-A, K.; TABATABAI, M. A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 100, p. 275–284, 2003.

LAMBERS, H.; PLAXTON, W. C. Phosphorus: back to the roots. In: PLAXTON, W. C.; LAMBERS, H. (Ed.). Phosphorus metabolism in plants. **Wiley-Blackwell Publishing**, p. 3–22, 2015.

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

LEITE, R. C.; CARNEIRO, J. S. S.; FREITAS, G. A.; CASALI, M. E.; SILVA, R. R. Adubação fosfatada na soja durante três safras consecutivas na nova fronteira agrícola Brasileira. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 4, p. 28-35, 2017.

LEVENTOGLU, H.; ERDAL, I. Effect of high humic substance levels on growth and nutrient concentration of corn under calcareous conditions. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 37, n. 12, p. 2074-2084, 2014.

LITTLE, K. R.; ROSE, M. T.; JACKSON, W. R.; CAVAGNARO, T. R.; PATTI, A. F. Do lignite-derived organic amendments improve early-stage pasture growth and key soil biological and physicochemical properties? **Crop and Pasture Science**, v. 65, n. 9, p. 899-910, 2014.

LOBO, T. F.; GRASSI FILHO, H.; BULL, L. T.; MOREIRA, L. L. Q.; MARTINS, R. L. Efeito do manejo e de níveis de lodo de esgoto na fertilidade do solo após três aplicações. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 2, p. 288-296, 2013.

MACHADO, M.I.C.S.; BRAUNER, J.L. & VIANNA, A.C.T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revisita Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 331-336, 1993.

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

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

MARCOLAN, A.L. **Suprimento e absorção de fósforo em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo.** (Tese de Doutorado). Porto Alegre, 124 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MARTINAZZO, R.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G. KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 563-570, 2007.

MATIAS, G. C. S. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo e teores de matéria orgânica.** 2010. 174 f. Tese (Doutorado em Ciências: Solos e Nutrição de Plantas) -Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MINHONI, M. T. A.; CARDOSO, J. B. N.; EIRA, A. Efeito de cinco tipos de matéria orgânica na solubilização microbiana de fosfato de rocha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 29–35, 1991.

MOREIRA, F. M. S. SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** 2ª ed. Lavras: Editora UFLA, 729p, 2006.

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

NESET, T. S. S.; CORDELL, D. Global phosphorus scarcity: Identifying synergies for a sustainable future. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Hoboken, v. 92, p. 2–6, 2012.

NETO, F. A.; GRAVINA, G. A.; SOUZA, N. O.; BEZERRA, A. A. C. Adubação fosfatada na cultura da soja na microrregião do Alto Médio Gurguéia. **Revisita Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 266-271, 2010.

NIKBAKHT, A.; BABALAR, M.; XIA, Y. P.; LUO, A.; ETEMADI, N. A. Effect of humic acid on plant growth, nutrient uptake, and postharvest life of gerbera. **Journal of Plant Nutrition**, Weinheim, v. 31, n. 12, p. 2155-2167, 2008.



NOVAIS, R. F. de; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. DE; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. DE; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 471–537, 2007.

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

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

OLIVEIRA, E. A. B. **Avaliação de método alternativo para extração e fracionamento de substâncias húmicas em fertilizantes orgânicos**. 2011. 48 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical: Tecnologia da Produção Agrícola) – Instituto Agrônomo de Campinas, São Paulo, 2011.

ONO, F. B.; MONTAGNA, J.; NOVELINO, J. O.; SERAFIM, M. E.; DALLASTA, D. C.; GARBIETE, M. V. Eficiência agrônômica de superfosfato triplo e fosfato natural de Arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciência e Agrotecnologia**., Lavras, v. 33, n. 3, p. 727-734, 2009.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 1-46, 1978.

PAVINATO, P. S.; DAO, T. H.; ROSOLEM, C. A. Tillage and phosphorus management effects on enzyme-labile bioactive phosphorus availability in Cerrado Oxisols. **Geoderma**. Amsterdam, v. 156, n. 3-4, p. 207-215, 2010.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 149-155, 2009.

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

PINHEIRO, G. L., SILVA, C. A., FURTINI NETO, A. E. Crescimento e nutrição de clone de eucalipto em resposta à aplicação de concentrações de C-ácido húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1217-1229, 2010.

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

RAIJ, B. VAN. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no Brasil. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**, Piracicaba, Potafos, p. 563-582, 2004.

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

RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 57, p. 77-159, 1997.

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

REDEL, Y.D.; RUBIO, R.; ROUANET, J.L.; BORIE, F. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, p. 388- 396, 2007.

RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; FAQUIN, N. C. V.; KIMPARA, D. I.; SANTOS, J. Z. L.; CARNEIRO, L. F. Fontes e modos de aplicação de fósforo para o milho em solo cultivado da região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 453-466, 2006.

RHEINHEIMER, D.S. e ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p. 151-160, 2001.

RODRIGUES, M. **Sistemas de manejo e dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos do Cerrado**. 2014. 113 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)

– Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

ROSAN, S. D.; SILVA, C. A.; MALUF, H. J. G. M. Humic acid-phosphate fertilizer interaction and extractable phosphorus in soils of contrasting texture. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 49, p. 32–42, 2018.

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

SANZ-SAEZ, A.; MORALES, F.; ARRESE-IGOR, C.; ARANJUELO, I. P Efficiency: A major limiting factor for rhizobial symbiosis. In: SULIEMAN, S.; PHAN TRAN, L.-S. (Ed.). **Legume nitrogen fixation in soils with low phosphorus availability**. Springer, p. 21–39, 2017.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT software version 9.2**. Cary, 2008.

SCHAEFER, CEGR; FABRIS, JD; KER, JC Minerais na fração argila de Latossolos brasileiros: uma revisão. **Argila Minerais**, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008.

SFREDO, G.J. Soja no Brasil: calagem, adubação e nutrição mineral. **Documentos / Embrapa Soja**, n.305 - Londrina: PR / Embrapa Soja, p. 148, 2008.

SHEN, J.; YUAN, L.; ZHANG, J.; LI, H.; BAI, Z.; CHEN, X.; ZHANG, W.; ZHANG, F. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant physiology**, Washington, v. 156, p. 997–1005, 2011.

SILVA, A. A.; SILVA, T.S.; VASCONCELOS, A.C.P.; LANA, R.M.Q. Influência da aplicação de diferentes fontes de MAP revestido com polímeros de liberação gradual na cultura do milho. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, p. 240-250, 2012.

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

SOUZA, R.F.; FAQUIM, V.; TORRES, P.R.F.; BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 975-983, 2006.

SOUZA, D. M. G. de; NUNES, R. S.; REIN, T. A.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. dos. Manejo do fósforo na região do Cerrado. **Práticas de manejo do solo para adequada nutrição de plantas no Cerrado**. Goiânia, p. 291-358, 2016.

STAMFORD, N. P.; SANTOS, P. R.; SANTOS, C. E. S.; FREITAS, A. D. S.; DIAS, S. H. L.; LIRA, M. A. Agronomic effectiveness of biofertilizers with phosphate rock, sulphur and *Acidithiobacillus* for yam bean grown on a Brazilian tableland acidic soil. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 1311–1318, 2007.

STEVENSON, F.J. Humus chemistry. **John Wiley & Sons**, New York, p. 496, 1994.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. **FAO fertilizer and plant nutrition bulletin**, v. 18, 2008.

TIRITAN, C.S.; SANTOS, D.H.; BORDINI, R.A.; FOLONI, J.S.S.; ONISHI, R.Y. Produção de matéria seca de milho em função da adubação fosfatada mineral e organomineral. **Colloquium Agrariae**, Bom Jesus, v. 6, n. 1, p. 1 -7, 2010.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. **Soil Fertility and Fertilizers**. New York: Macmillan, p.176-229, 1993.

TOKURA, A. M.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FAQUIN, V. KURIHARA, C. H.; ALOVISI, A. A. Forma de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1467-1476, 2002.

URRUTIA, O.; ERRO, J.; GUARDADO, I.; CLAUDE YVUN, J.; MA GARCIA-MINA, J. Physico-chemical characterization of humic-metal-phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate-based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, p. 128-136, 2014.

USGS. **Mineral commodity summaries 2017**. US Geological Survey, 2017. Disponível em: < <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2018.

WOLTHOORN, A.; TEMMINGHOFF, E. J. M.; WENG, L.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Colloid formation in groundwater: effect of phosphate, manganese, silicate and dissolved organic matter on the dynamic and heterogeneous oxidation of ferrous iron. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 19, p. 611-622, 2004.

VIEIRA, R. B. V.; FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C.; MORAES, R. P.; CARNIEL, E. Adubação fosfatada para alta produtividade de soja, milho e cereais de inverno cultivados em rotação em Latossolos em plantio direto no centro-sul do Paraná. **Revisita Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 794-808, 2015.

YANG, J. C.; WANG, Z.G.; ZHOU, J.; JIANG, H.M.; ZHANG, J.F.; PAN, P.; GE, C.L. Inorganic phosphorus fractionation and its translocation dynamics in a low-P soil. **Journal of environmental radioactivity**, v. 112, p. 64-69, 2012.

ZAVARZINA, A. G.; ZAVARZIN, G. A. Humic substances in the early biosphere. **Paleontological Journal**, Russia, v. 47, p. 984–988, 2013.

ZHEN-YU, D.U.; QING-HUA, W.A.N.G; FANG-CHUN, L.I.U; HAI-LIN, M.A.; BINGYAO, M.A.; MALHI; S.S. Movement of phosphorus in a calcareous soil as affected by humic acid. **Pedosphere**, Madison, v. 23, n. 2, p. 229-235, 2013.