

**DJALMA EUGÊNIO SCHMITT**

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DE FONTES ORGÂNICAS  
ÀS PLANTAS EM SOLOS COM DIFERENTES TEORES  
INICIAIS DE FÓSFORO**

Tese apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Doutor no Curso de  
Pós-graduação em Ciência do Solo da  
Universidade do Estado de Santa Catarina -  
UDESC.

Orientador: Dr. Luciano Colpo Gatiboni  
Co-orientadores: PhD Paulo Roberto Ernani

**Lages, SC  
2016**

Schmitt, Djalma Schmitt

Disponibilidade de fósforo de fontes orgânicas às plantas em solos com diferentes teores iniciais de fósforo / Djalma Eugênio Schmitt. - Lages, 2016.

136 p. : il. ; 21 cm

Orientador: Luciano Colpo Gatiboni

Coorientador: Paulo Roberto Ernani

Inclui bibliografia

Tese (doutorado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2016.

1. Frações de fósforo. 2. Fósforo fítico. 3. Glicerolfosfato. I. Schmitt, Djalma Eugênio. II. Gatiboni, Luciano Colpo. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Disponibilidade de fósforo de fontes orgânicas às plantas em solos com diferentes teores iniciais de fósforo.

Ficha catalográfica elaborado pelo autor

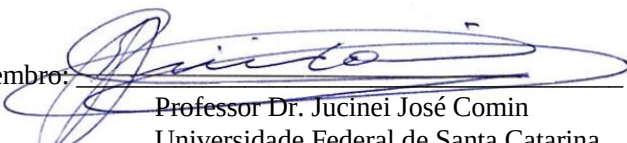
**DJALMA EUGÊNIO SCHMITT**

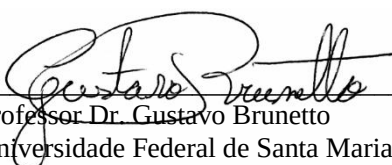
**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DE FONTES ORGÂNICAS  
ÀS PLANTAS EM SOLOS COM DIFERENTES TEORES  
INICIAIS DE FÓSFORO**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

**Banca Examinadora:**

Orientador: \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Luciano Colpo Gatiboni  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro:  \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Jucinei José Comin  
Universidade Federal de Santa Catarina

Membro:  \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Gustavo Brunetto  
Universidade Federal de Santa Maria

Membro: \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Álvaro Luiz Mafra  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro: \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Paulo César Cassol  
Universidade do Estado de Santa Catarina

**Lages, SC, 11 de fevereiro de 2016.**



Dedico este trabalho aos meus  
pais, Paulo Eugênio Schmitt e  
Angélica Schmitt pela educação  
dada a mim



## **AGRADECIMENTOS**

À Deus pela saúde.

À Universidade do Estado de Santa Catarina, pela oportunidade de proporcionar um ambiente de qualidade de ensino e crescimento profissional e pessoal.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pelos ensinamentos transmitidos e dedicação.

Ao professor orientador Luciano Colpo Gatiboni pela amizade, apoio, confiança e incentivo durante esses anos.

Aos Bolsistas, mestrandos e doutorandos que ajudaram no desenvolvimento desse trabalho, especialmente ao Daniel João Dall Orsoletta, Gustavo Boitt e Joice Heideman.

Ao Professor Paulo Pagliari, que me recebeu no Southwest Research and Outreach Center durante o período de Sanduiche e à University Minnesota pela estrutura.

Aos amigos que formamos durante esse período, tanto no ambiente de análises, como em sala de aula.

Aos meus Familiares que sempre me apoiaram.

À Capes pela concessão das bolsas de estudo.





## RESUMO

SCHMITT, D. E. **DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO DE FONTES ORGÂNICAS ÀS PLANTAS EM SOLOS COM DIFERENTES TEORES INICIAIS DE FÓSFORO**. 2016. 136p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina – Programa de Pós graduação em Ciência do Solo, Lages, 2016

O fósforo (P) geralmente é um dos nutrientes que mais limita a produtividade em solos tropicais e subtropicais, ocorrendo tanto em formas orgânicas quanto na forma inorgânica e com diferentes labilidades. Mas é pouco sabido em que condições essas formas orgânicas de P podem ser, após mineralização, utilizadas pelas plantas. O objetivo desse estudo foi avaliar a disponibilidade de fontes orgânicas de fósforo por plantas de milho e trigo em solos com diferentes teores iniciais de fósforo. Foi conduzido um experimento em vasos em dois solos, um de textura arenosa e um de textura média, ambos com teor “muito baixo” de fósforo. Os solos foram moídos, tamizados e, posteriormente, incubados por 30 dias com calcário e doses de superfosfato triplo para elevar o pH até 6,0 e os teores de P até os níveis “baixo”, “médio” e “alto”, respectivamente. Após nova secagem e moagem do solo, foram constituídos os seguintes tratamentos, em esquema fatorial (4x4), com quatro repetições: Fator 1 – níveis iniciais de fósforo “muito baixo” “baixo”, “médio” e “alto”; Fator 2 – adubação fosfatada suplementar com as seguintes fontes de P: testemunha (sem adição de P); adição de P orgânico de baixa labilidade (ácido fítico); adição de ácido orgânico de alta labilidade (glicerolfosfato); adição de P inorgânico solúvel (reagente PA). As fontes de P do fator 2 foram aplicadas em dose equivalente a 125 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. No solo arenoso, foi cultivado milho (*Zea mays* L.) seguido por trigo (*Triticum aestivum* L.) e no argiloso foi cultivado milho. Após cada cultivo foram medidos a produção de massa seca de parte aérea e raízes, o teor de P

absorvido pelas plantas e no solo foi realizado fracionamento químico das formas de P. As plantas de milho e de trigo responderam linearmente ao incremento de disponibilidade de P, mas não houve interação entre os fatores estudados. As plantas de milho e de trigo responderam à aplicação de P-glicerolfosfato, sendo que contribuiu para a nutrição das plantas de milho, sendo superior ou semelhante à fonte solúvel. O P-glicerolfosfato foi detectado nas frações inorgânicas de P lábil, mostrando que houve mineralização, enquanto o P-fítico foi constatado principalmente nas frações orgânicas moderadamente lábeis e não lábeis, evidenciando sua adsorção com os constituintes do solo e sua baixa labilidade.

**Palavras-chave:** Fracções de fósforo. Fósforo fítico. Glicerolfosfato. Nutrição vegetal. Adubação.

## ABSTRACT

SCHMITT, D. E. **PHOSPHORUS AVAILABILITY OF ORGANIC SOURCES TO PLANTS IN SOIL WITH DIFFERENT INITIAL LEVELS OF PHOSPHORUS**. 2016. 136p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina – Programa de Pós graduação em Ciência do Solo, Lages, 2016

Phosphorus (P) is the nutrient that most limit productivity in tropical and subtropical soils occurring as in organic form as in the inorganic form with different labilities; little is known in what conditions these organic forms of P can be available to plants after mineralization. The aim of this study was to evaluate the utilization of organic phosphorus by corn and wheat in soils with different initial levels of labile phosphorus. Two soils were used (sandy and clayey texture) both with "very low" initial level of phosphorus. The soils were ground, sieved and incubated for 30 days with lime and superphosphate rates to raise the pH to 6.0 and available P to "low", "medium" and "high" Contents. Soil treatments consisted in a factorial arrangement (4x4) with four replications: factor 1 - Initial phosphorus contents "very low", "low", "medium" and "high"; factor 2 - additional phosphate fertilizer with the following P sources: control (no additional P use); use of organic phosphorus with low degradability (phytic acid); use of organic phosphorus with high degradability (glycerolphosphate); use of soluble inorganic phosphorus (PA reagent). The P sources were applied at a rate equivalent to 125 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. In the sandy soil it was grown corn (*Zea mays*) followed by wheat (*Triticum aestivum*) and in the clayey soil it was grown corn. After each crop it were measured dry matter production of shoot and root; P absorbed by plants and soil P by chemical fractionation. Plants of corn and wheat responded linearly to the increase of P availability but there was no interaction between treatments. Corn and wheat respond to application of P-glycerolphosphate, contributing to

the P absorption by plants, higher than or similar to soluble source. The P-glycerophosphate was detected in the inorganic fractions of labile P, showing that there was mineralization while the P-phytic was mainly found in the moderately and no labile organic fractions, demonstrating its adsorption to the soil and low lability.

**Key-words:** Phosphorus fraction. Phytic Phosphorus. Glycerophosphate. Plant nutrition. Fertilizing.

## LISTA DE TABELAS

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1-  | Caracterização inicial dos dois solos do estudo na camada de 0-20 cm. ....                                                                                                                                                                                                                                                                            | 41 |
| Tabela 2-  | Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo no tecido de raiz e parte aérea de milho nos teores iniciais de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho. .... | 53 |
| Tabela 3 - | Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo no tecido de raiz e parte aérea de trigo nos teores de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico em cultivo sucessivo de milho. ....    | 57 |
| Tabela 4 - | Fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e $\text{NaHCO}_3$ 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PiBIC) após o cultivo do milho nos teores de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg <sup>-1</sup> . ....        | 59 |
| Tabela 5 - | Fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> (PiOH-I) e NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PiOH-II) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg <sup>-1</sup> . ....       | 62 |
| Tabela 6 - | Fósforo inorgânico extraído por HCl 1 mol L <sup>-1</sup> (PiHCl) e fósforo residual (PRES) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-                                                                                                                       |    |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|           | solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg <sup>-1</sup> . ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 64 |
| Tabela 7  | - Fósforo orgânico extraído por NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PoBIC), NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> (PoOH-I) e NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PoOH-II) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg <sup>-1</sup> . ....            | 67 |
| Tabela 8  | - Fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PiBIC) após o cultivo do milho e de trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg <sup>-1</sup> . ....                                         | 70 |
| Tabela 9  | - Fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> (PiOH-I) e 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PiOH-II) após o cultivo do milho e de trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg <sup>-1</sup> . ....                                                        | 72 |
| Tabela 10 | - Fósforo inorgânico extraído por HCl 1,0 mol L <sup>-1</sup> (PiHCl) e P residual extraído com H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (PRES) após o cultivo do milho e de trigo nos teores iniciais P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg <sup>-1</sup> . .... | 74 |
| Tabela 11 | - Fósforo orgânico extraído por NaHCO <sub>3</sub> 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PoBIC), NaOH 0,1 mol L <sup>-1</sup> (PoOH-I) e NaOH 0,5 mol L <sup>-1</sup> (PoOH-II) após o cultivo do milho e do trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-                                                                                              |    |

|             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|             | solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo<br>distrófico. Resultados em $\text{mg kg}^{-1}$ .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 77 |
| Tabela 12 - | Produção de massa seca, concentração e absorção de<br>fósforo no tecido de milho nos teores de P disponível<br>muito baixo, baixo, médio e alto em função da<br>aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e<br>uma testemunha sem adição de P em um Nitossolo<br>Bruno após o cultivo de milho. ....                                                                                                                                                | 81 |
| Tabela 13 - | Fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de<br>ânions ( $\text{PiRTA}$ ) e $\text{NaHCO}_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ( $\text{PiBIC}$ ) após<br>o cultivo do milho nos teores de P muito baixo,<br>baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-<br>glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitosso Bruno.<br>Resultados em $\text{mg kg}^{-1}$ . ....                                                                                                  | 84 |
| Tabela 14 - | Fósforo inorgânico extraído por $\text{NaOH}$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$<br>( $\text{NaOH-I}$ ) e por $\text{NaOH}$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ( $\text{NaOH-II}$ ) após<br>o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito<br>baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico,<br>P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo<br>Bruno. Resultados em $\text{mg kg}^{-1}$ . ....                                                                         | 86 |
| Tabela 15 - | Fósforo inorgânico extraído por $\text{HCl}$ $1,0 \text{ mol L}^{-1}$<br>( $\text{PiHCl}$ ) e por $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ ( $\text{PRES}$ ) após o cultivo<br>do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo,<br>médio e alto com aplicação de P-fítico, P-<br>glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno.<br>Resultados em $\text{mg kg}^{-1}$ . ....                                                                     | 88 |
| Tabela 16 - | Fósforo orgânico extraído por $\text{NaHCO}_3$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$<br>( $\text{PoBIC}$ ), $\text{NaOH}$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ( $\text{PoOH-I}$ ) e por $\text{NaOH}$<br>$0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ( $\text{PoOH-II}$ ) após o cultivo do milho nos<br>teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto<br>com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-<br>solúvel em um Nitossolo Bruno. Resultados em $\text{mg}$<br>$\text{kg}^{-1}$ ..... | 90 |





## **LISTA DE FIGURAS**

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Esquema de fracionamento químico de fósforo<br>proposto por Hedley et al. (1982), com modificações<br>de Condon e Goh (1989)..... | 46 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|



## SUMÁRIO

|          |                                                                        |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>                                          | <b>21</b> |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                     | <b>23</b> |
| 2.1      | O FÓSFORO NO SOLO.....                                                 | 23        |
| 2.2      | MECANISMOS QUE AUMENTAM A EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO .....    | 26        |
| 2.3      | O FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO .....                                       | 28        |
| 2.4      | USO DE P <sub>o</sub> ORGÂNICO PELAS PLANTAS .....                     | 33        |
| <b>3</b> | <b>HIPÓTESES: .....</b>                                                | <b>37</b> |
| <b>4</b> | <b>OBJETIVOS.....</b>                                                  | <b>39</b> |
| 4.1      | OBJETIVO GERAL .....                                                   | 39        |
| <b>5</b> | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                        | <b>41</b> |
| 5.1      | COLETA DO SOLO .....                                                   | 41        |
| 5.2      | CONSTRUÇÃO DOS NÍVEIS DE FERTILIDADE DO SOLO.....                      | 41        |
| 5.3      | APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS .....                                        | 42        |
| 5.4      | CULTIVO DE MILHO E TRIGO NO ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO..... | 43        |
| 5.5      | CULTIVO DE MILHO NO NITOSSOLO BRUNO .....                              | 45        |
| 5.6      | FRACIONAMENTO QUÍMICO DE FÓSFORO .....                                 | 45        |
| 5.7      | ANÁLISE ESTATÍSTICA.....                                               | 47        |
| <b>6</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                                     | <b>49</b> |
| 6.1      | CULTIVO DE MILHO EM ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO .....        | 49        |
| 6.2      | CULTIVO SUCESSIVO COM TRIGO .....                                      | 54        |
| 6.3      | FRAÇÕES DE P NO ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO .....            | 58        |
| 6.3.1    | Primeiro cultivo - milho.....                                          | 58        |

|       |                                                                        |            |
|-------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.2 | Frações de P após o cultivo sucessivo com trigo.....                   | 68         |
| 6.4   | UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO ORGÂNICO POR PLANTAS EM UM NITOSSOLO BRUNO ..... | 78         |
| 6.4.1 | Rendimento e frações de fósforo no solo .....                          | 78         |
| 7     | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                | <b>93</b>  |
| 8     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                                      | <b>95</b>  |
| 9     | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                | <b>97</b>  |
| 10    | <b>APÊNDICES.....</b>                                                  | <b>111</b> |

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) é um elemento que interage fortemente com os constituintes do solo, tanto à fração orgânica como a fração inorgânica, principalmente em solos intemperizados, limitando o crescimento das plantas. No entanto, algumas plantas podem apresentar estratégias adaptativas que melhoram a aquisição de P do solo, melhorando a absorção pelas plantas (RICHARDSON et al., 2005; MCLAREN et al., 2013).

Embora as plantas e os microrganismos utilizam diretamente o fósforo inorgânico (Pi), o fósforo orgânico (Po) é de grande importância nos solos, principalmente nos intemperizados. A utilização de fontes orgânicas de P é pouco estudada, principalmente em solos tropicais. Isso se deve, provavelmente pela dificuldade metodológica na avaliação da real absorção de P pelas plantas, já que, geralmente, é utilizado análise de ressonância magnética nuclear que é uma técnica cara e que apresenta limitações. Outra técnica que pode ser usada é a utilização de fracionamento químico de P (Hedley et al., 1982) que diferencia em frações lábeis e moderadamente lábil. Assim, a grande maioria dos trabalhos tem avaliado a quantidade de Po presente no solo através da ressonância magnética nuclear, sendo que parte desses trabalhos apresenta resultados semelhantes, com acúmulo no solo de Po não lábil, principalmente na forma de P fítico (CONDRON et al., 1990a; TURNER; CADE-MENUN; WESTERMANN, 2003; TURNER; MAHIEU; CONDRON, 2003a, 2003b; GEORGE et al., 2006; GATIBONI et al., 2013b).

Em solos pouco intemperizados, as fontes orgânicas de P podem apresentar uma elevada contribuição para o desempenho das plantas, dependendo principalmente da espécie (STEFFENS et al., 2010). Mas em solos intemperizados, que apresentam elevado teor de oxihidróxidos de Fe e Al, e uma forte interação desses minerais com o P, elas podem apresentar pouca

contribuição para o desenvolvimento das plantas. Por outro lado, as plantas podem desencadear mecanismos que aumentam a utilização dessas fontes de Po, principalmente quando a quantidade de P disponível é muito baixa, já que existem vários mecanismos que os microrganismos e as plantas desenvolveram para aumentar a eficiência da utilização de P (SHEN et al., 2011).

O objetivo desse estudo foi avaliar a contribuição do fósforo orgânico fítico e glicerolfosfato no desempenho de plantas de milho e de trigo em dois solos com teores de argila contrastantes e com diferentes teores iniciais de fósforo disponível no solo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O FÓSFORO NO SOLO

O fósforo (P) é um dos nutrientes mais limitantes nos sistemas agrícolas, principalmente em solos com médio a elevado grau de intemperismo. O P pode ser separado em dois compartimentos: o fósforo inorgânico (Pi) e o fósforo orgânico (Po). Inicialmente, todo o P do solo é proveniente da intemperização dos minerais primários, como a apatita (WALKER; SYERS, 1976).

Assim, ao longo de milhões de anos de ação do intemperismo atuando sobre a rocha e o solo, praticamente todo P presente no mineral primário, foi dissolvido e liberado no solo na forma de Pi. Uma porção pequena desse Pi fica na solução ou é adsorvido na superfície do solo com menor energia de adsorção. Essa porção do Pi que fica adsorvido aos coloides pode ser liberada para a solução e contribuir para a absorção tanto das plantas, quanto dos microrganismos do solo (YANG; POST, 2011).

A grande parte do P fica adsorvido em minerais secundários do solo, como as argilas silicatadas e os oxihidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), que são porções que retêm grande quantidade de P nos solos intemperizados. Eriksson et al. (2015) realizaram especiação da fração argila em solos sem e com aplicação de fertilizantes fosfatados, utilizando a espectroscopia de lâmina de P (*Xanes*), e mostraram que em solos que contêm teor de Fe oxalato acima de 35 mmol kg<sup>-1</sup>, o P encontra-se principalmente adsorvido nos oxihidróxidos de Fe, enquanto após as fertilizações, o P fica principalmente adsorvido nos oxihidróxidos de Al. Em solos com pH abaixo de 6,0 a disponibilidade de P é controlada principalmente pelo Al e Fe (GAGNON et al., 2012), mostrando que esses são os principais adsorventes em solos com médio a elevado grau de intemperismo.

Essa alta afinidade do P com os óxidos de Fe e Al interfere na disponibilidade de P e na recomendação de P para as plantas. Assim, em solos com alta capacidade de adsorção, uma pequena quantidade (menos de 1 %) do P adicionado é recuperado pelos extratores químicos (NAIDU et al., 1987). Já para solos menos sortivos, de 15 a 30 % do P adicionado foi extraído por extratores, considerados como P disponível (Olsen e Mehlich 1) (NAIDU et al., 1987).

Em solos com alta capacidade de sorção é comum aplicações de 5 vezes mais P no solo do que é exportado como produto (CQFS-RS/SC, 2004). Esses valores variam e são dependentes do poder tampão de P, que é a resistência para mudança sobre adição ou remoção de P (KAMPRATH, 1999). A média de P exportado pela colheita após os níveis de P no solo ficarem no teor adequado foi de 12-13 kg de P ha<sup>-1</sup> para a soja ao longo de 14 anos e de 14-22 kg de P ha<sup>-1</sup> para o milho, com produtividade média de 1,8 a 2,1 toneladas por hectare de soja e de 5,1 a 7,3 toneladas por hectare para o milho (KAMPRATH, 1999). Essas quantidades de P extraídas pela cultura de milho e de soja são inferiores se comparadas com a quantidade de fertilizante fosfatado que normalmente é recomendada pelo manual de adubação e calagem para o estado de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (CQFS-RS/SC 2004). Mesmo em sistemas de exploração de baixa produção, há uma necessidade de aplicações de P que podem, pelo menos, cobrir a quantidade de P exportado em produtos.

Com o aumento do grau de intemperismo do solo, há maior predomínio de oxihidróxidos de Fe e Al na fração argila e como estes apresentam muito sítios reativos, grande parte do P adicionado ou presente no solo fica adsorvido nesse compartimento. Essa maior reatividade de P com os oxihidróxidos de Fe e Al é referente ao número de sítios adsortivos que estão presentes sobre toda a superfície do óxido, em relação aos demais minerais de argila, como a caulinita, que



apresenta grupos silanol apenas nas bordas silicatadas, enquanto os óxidos de Fe apresentam superfície adsorvente em toda a superfície do óxido (WEI et al., 2014).

Além do alto número de sítios adsorptivos, o P tende a se reordenar e formar ligações mais fortes, ficando ocluso (WALKER; SYERS, 1976; YANG; POST, 2011). Assim, os solos intemperizados possuem grande parte de P na forma oclusa, que é um compartimento ocluso, de pouca labilidade (WALKER; SYERS, 1976; BOITT, 2014) e de baixa reversibilidade. Essas reações de oclusão, tendem a ser devido a reações de P com óxidos de Fe amorfos, com a penetração do P nas imperfeições dos óxidos. Essa oclusão inicia também em solos fertilizados, logo após a aplicação de fertilizantes. Em um estudo realizado por Büneemann et al. (2004), onde aplicaram  $^{32}\text{P}$  em um solo altamente intemperizado, os autores mostraram que o total de P recuperado do solo a partir da resina trocadora de ânions (RTA), NaOH e  $\text{NaHCO}_3$  foi de 73% após 63 dias de incubação. Isso mostra que parte do P aplicado se adsorveu em locais com alta energia de adsorção, formando ligações mais estáveis, possivelmente na forma de P ocluso. Esse P presente em formas oclusas apresenta baixa capacidade de contribuição para as plantas e microrganismos (GATIBONI et al., 2007).

Com o desenvolvimento do solo, parte do  $\text{P}_i$  é absorvido pelas plantas e microrganismos, fazendo parte da estrutura dos mesmos. Após a morte e decomposição das plantas, ocorre acúmulo de  $\text{P}_o$ , dependendo principalmente da taxa de adição de material orgânico e de fatores climáticos, até ocorrer o equilíbrio entre a taxa de adição e a de mineralização. Já em ambientes cultivados, além desses fatores, outros como adubação, manejo e tipo de cultivo podem influenciar no estoque de  $\text{P}_o$  (CONDRON et al., 1990a; RICHARDSON et al., 2005).

Para ser utilizado pelas plantas e microrganismos, esse  $\text{P}_o$  precisa ser mineralizado biologicamente, através da ação de enzimas (MCGILL; COLE, 1981; RICHARDSON et al., 2001).

Essa contribuição é muito importante em plantas com menor taxa de absorção de P, como as espécies florestais, que conseguem absorver grande parte do P a partir da serapilheira (YANG; POST, 2011). Assim, em solos com médio a elevado grau de intemperismo, as frações de Po podem ter importante participação para as plantas (CROSS; SCHLESINGER, 1995; YANG; POST, 2011). No entanto, a biomassa microbiana do solo também pode competir pelo P do solo e diminuir a disponibilidade para as plantas (HEUCK; ALFONS; MARIE, 2015).

## 2.2 MECANISMOS QUE AUMENTAM A EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO

Como os fertilizantes fosfatados são finitos e apresentam participação expressiva nos custos de produção, é de suma importância o uso adequado e criterioso dos fertilizantes fosfatados. Além disso, o conteúdo das reservas de fertilizantes fosfatados vem diminuindo ao longo dos anos (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009; DEGRYSE et al., 2013). Por isso, nos últimos anos tem surgido pesquisas para buscar maior eficiência do uso do P nos sistemas agrícolas (DEGRYSE et al., 2013).

As plantas e microrganismos apresentam alguns mecanismos que podem aumentar a eficiência da adubação fosfatada (GUPPY et al., 2005; SHEN et al., 2011). O mais estudado e um dos mais eficazes é a associação da raiz da planta com fungos micorrízicos para aumentar o volume de solo explorado e assim a absorção de P. Esse mecanismo ocorre na maioria das espécies de plantas e pode ser considerado como muito importante, tanto em espécies agrícolas como florestais.

Outro mecanismo que é apresentado na literatura é a exsudação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular que podem competir com os ânions do solo pelos sítios de adsorção

e inibir a adsorção de P no solo (GUPPY et al., 2005; YANG; POST, 2011). Esses ácidos orgânicos também podem se ligar a metais e diminuir a atividade de metais como Al e Fe na solução do solo (HUE, 1991), podendo aumentar inclusive a disponibilidade de Po.

A decomposição dos resíduos orgânicos e parte da matéria orgânica do solo pode liberar ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Esses ácidos orgânicos estão presentes em solos e resíduos orgânicos e seus teores são variados nos diferentes resíduos (PINHEIRO et al., 2013). No entanto, esses ácidos orgânicos de baixo peso molecular apresentam baixa estabilidade e seu tempo de meia vida pode durar apenas poucas horas.

Apesar dos ácidos orgânicos apresentarem baixo tempo de vida no solo, sua contínua produção através da decomposição da matéria orgânica do solo, exsudação através das raízes e metabólitos microbianos fazem desses ácidos importantes mecanismos que podem ter sinergismo com os ânions presentes no solo e diminuir a adsorção de P do solo (HUE, 1991). Pouco se sabe sobre o real efeito desse mecanismo na inibição da adsorção de P ao solo. A maioria dos trabalhos são realizados com adição de doses elevadas de ácidos orgânicos no solo, o que não ocorre na solução do solo. Além disso, a própria matéria orgânica do solo pode ter efeito na inibição da adsorção/precipitação de P no solo. Em solo com mesmo teor de argila e mineralogia, mas com 2 % a mais de carbono orgânico, foi necessária uma menor quantidade de P para atender 0,2 mg P L<sup>-1</sup> na solução do solo (HUE, 1991), mostrando efeito positivo na diminuição da adsorção de P no solo.

A exsudação de enzimas também é apresentada na literatura como um mecanismo que pode aumentar a eficiência da utilização de fósforo (MCDOWELL; SHARPLEY, 2001; REQUEJO), o que levou pesquisadores a tentarem isolar estirpes de fungos e bactérias ditas como solubilizadoras de P,

com o intuito de aumentar a eficiência da utilização de P . Alguns trabalhos mostraram que, em laboratório, algumas estipes foram eficazes na solubilização de fosfato de cálcio (SILVA FILHO; NARLOCH; SCHARF, 2002; SILVA FILHO; VIDOR, 2000, 2001), mas quando esses materiais são aplicados em vasos com plantas, os resultados são controversos (ALVES; MENDOZA; SILVA FILHO, 2002). Além disso, os isolados mostraram pouca habilidade em solubilizar fosfato de Fe e de Al (SILVA FILHO; VIDOR, 2000), que é predominante nos solos intemperizados.

Outro mecanismo da inibição da adsorção de P é a presença de ácidos húmicos de alto peso molecular. Os ácidos húmicos fornecem um material atrativo para os microrganismos e também para melhorar a disponibilidade de nutrientes em solos cultivados e incrementar a produtividade; por causa das moléculas orgânicas competem com os ânions fosfatos nos locais de retenção de P (YANG et al., 2013), semelhante aos ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

Todos esses processos apresentados acima podem afetar a eficiência da adubação fosfatada. No entanto, esses processos podem ser influenciados por uma vasta gama de fatores do solo, como pH, mineralogia e nível nutricional da planta. Dentre esses fatores, o teor de disponibilidade de P no solo pode ser fundamental para a utilização de fontes nativas de P pelas plantas (SHEN et al., 2011), visto que em condições adequadas de disponibilidade a planta pode não utilizar os mecanismos como exsudação de fosfatases e ou ácidos orgânicos, pois é um processo que requer gasto energético.

## 2.3 O FÓSFORO ORGÂNICO DO SOLO

O Po do solo é proveniente de tecidos animais, vegetais e de organismos do solo. Os solos podem apresentar de 30 a 90 % do P total na forma de Po. Geralmente, mais de 50% do P está

na forma de Po, sendo dependente do tipo de solo, clima e uso (RICHARDSON et al., 2005; NASH et al., 2014). A dinâmica do Po está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Assim, as plantas são importante rota da incorporação do fosfato no solo através da senescência e, ou, queda de parte da matéria seca aérea no solo, e, ou pela decomposição das raízes, e, ou, através dos animais herbívoros, facilitando o retorno tanto do Pi como do Po (RICHARDSON et al., 2005).

No solo, o Po pode ser dividido em Po presente na matéria orgânica do solo e Po presente nos microrganismos. Geralmente cerca de 90 % do Po está presente na matéria orgânica do solo, através da decomposição e estabilização da matéria orgânica. Por outro lado, esse Po presente na matéria orgânica, pode ser dividido em Po lábil e Po não lábil, de acordo com a maior ou menor facilidade de utilização pelas plantas e microrganismos.

O Po lábil do solo, caracteriza-se pela estrutura diesterfosfato, que é composto por fosfolipídios e ácidos nucleicos, possui estrutura química que facilita sua degradação pelos microrganismos do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Já o Po não lábil, que caracteriza-se pela forma monoesterfosfato como o P inositol, tende a apresentar forte interação com os minerais do solo (BERG; JOERN, 2006; DOOLETTE; SMERNIK; DOUGHERTY, 2010; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008) e, por isso, acaba se acumulando no solo. Em estudo realizado com solos ácidos nativos da Nova Zelândia, Chen et al. (2004), avaliaram que o ortofosfato monoéster foi a espécie predominante de Po extraível nos solos de campo nativo, sendo que muito pouco P diéster (forma de Po lábil) foi encontrado no solo. O ortofosfato monoéster inclui inositol fosfatos, açúcar fosfatado e mononucleotídeo (CONDRON et al., 1990a). Desses, o P fítico

é o mais estável, dando proteção ao ataque enzimático pela forte complexação com os minerais do solo, argilas e componentes húmicos quando presente no solo (TURNER et al., 2002). Alguns estudos têm mostrado forte interação do P inositol no solo (BERG; JOERN, 2006; FUENTES et al., 2014) e, conseqüentemente, apresentando menor disponibilidade para as plantas. Os microrganismos do solo podem atuar nesses materiais, exsudando enzimas e catalizando reações que liberam parte do Po presente no material. A hidrólise de Po e a liberação de Pi pela atividade enzimática é afetada por uma ampla gama de fatores incluindo (I): a natureza química do P orgânico e a habilidade para interagir com a matriz do solo; (II) organismos que facilitam a mineralização; (III) mineralogia do solo; (IV) eletrólitos presentes na solução do solo; e (V) propriedades físico-químicas (NASH et al., 2014).

McGill e Cole (1981) propuseram duas rotas de mineralização do Po; uma através dos microrganismos do solo, que oxidam o carbono do solo para obter energia e assim mineralizam N, S e P, e outra através da ação de enzimas que extraem somente o P presente no material sem mineralizar o resto do material (mineralização bioquímica). Os microrganismos, quando estimuladas pela presença de novas entradas de carbono orgânico lábil, podem mineralizar a matéria orgânica do solo ('priming') para absorver nutrientes (NOTTINGHAM et al., 2015). No entanto, o comportamento da mineralização ainda é muito discutido e permanece de certa forma obscuro, principalmente, devido à relação C:P. Ainda não há um entendimento claro da relação C:N:P no solo como ocorre com a relação C:N.

O Papel do Po no solo é geralmente negligenciado, principalmente por causa da difícil avaliação desse compartimento na nutrição das plantas. Até mesmo os extratores químicos que são utilizados nos métodos de rotina de análise de solo, não conseguem determinar a importância do Po para as

plantas (STEFFENS et al., 2010). Espécies de P ligado organicamente são importantes fontes, no qual a imobilização e mineralização dessas afetam a solubilidade do fosfato (ERIKSSON et al., 2015). Além disso, espécies de Po são importantes em solos com baixa ou nenhuma entrada de P, principalmente com espécies nativas (CHEN et al., 2004).

Existe um grande número de trabalhos onde são mostrados os diferentes compartimentos de Po no solo, como P fítico, DNA, fosfolipídio (CONDRON et al., 1990a, TURNER; CADE-MENUN, 2003; GEORGE et al., 2006; GATIBONI et al., 2013). Com o uso de muitas técnicas e estudos se tem tentado determinar a natureza química do acúmulo de P no solo (MCLAUGHLIN et al., 2011). No entanto, esses esforços ainda não geraram uma clara e consistente figura do destino do P adicionado no solo. Uma das razões para essa falha é que há vários destinos do P adicionado no solo, mas vários outros fatores como a taxa, depende das propriedades do solo, condições ambientais e tempo (MCLAUGHLIN et al., 2011).

O aumento do compartimento de Po no solo pode estar relacionado com a adição de fontes de resíduos orgânicos, como os dejetos. Isso ocorre principalmente porque os animais monogástricos, inclusive os humanos, não apresentam enzimas digestivas para degradar o P fítico presente nos alimentos (TURNER et al., 2005). Esses ambientes que recebem dejetos de animais são importantes devido ao acúmulo tanto de Pi como de Po (GUARDINI et al., 2012), principalmente em regiões com grande número de animais. Inicialmente parte desse Po (principalmente inositol fosfato) pode formar forte interação com o solo, mas após aplicações sucessivas e saturação de parte dos sítios adsorptivos, parte do P adicionado pode ser perdido por lixiviação, inclusive Po.

Existem algumas metodologias que podem ser usadas para avaliar os compostos de Po presentes no solo. Uma dessas técnicas é fracionamento químico de P de Hedley et al. (1982),

que extrai P inorgânico e orgânico que compreende compartimentos de P lábil, moderadamente lábil e não lábil (CROSS; SCHLESINGER, 1995; GATIBONI et al., 2013b). Para o Po, esse esquema extrai (I) Po considerado de frações orgânicas de fácil mineralização; (II) Po associado com ácidos húmicos e fúlvicos; e (III) P residual de difícil acesso pelos microrganismos.

Avaliando diferentes tipos dejetos de animais e com diferentes extratores, Turner e Leytem (2004) encontraram que 84 % do P do extrator NaOH e HCl na cama de frango, que é considerado um extrator de Po pouco solúvel, estava na forma de ácido fítico. Já nos dejetos de bovinos e de suínos tiveram uma porção de P extraído na água, mostrando que o P fítico pode ser lixiviado. Os autores consideram que o P orgânico em frações prontamente solúveis inclui o P contido no DNA, fosfolipídios (TURNER; LEYTEM, 2004). Esses compostos são sorvidos fracamente aos solos e, então, são móveis no perfil do solo, tendo um grande impacto ambiental.

Como o Pi reage com os minerais do solo, alguns tipos de Po também apresentam alta afinidade pelos constituintes do solo. Assim, em termos de quantidade de P, a adsorção de Po (principalmente fosfato inositol) pode ocorrer em maior quantidade do que Pi (SHANG et al., 2013). Os autores não apresentaram uma justificativa para o fato de o P fítico ser adsorvido em maior quantidade em óxidos do que o Pi, já que os sítios adsortivos são os mesmos. Essa maior adsorção de P fítico pode ser devido à estrutura química do Po utilizado, já que o Po inositol hexakisfosfato usado no estudo é formado por um anel com 6 átomos de carbono e em cada átomo de carbono há um grupamento fosfato. Assim, no local onde ocorre a adsorção de apenas um fosfato inorgânico, pode ocorrer até 6 fosfatos de hexakisfosfato. Esse mecanismo quando presente no solo, pode limitar a disponibilidade de Po para as plantas, já que o acesso à



cadeia carbonada é dificultado pelos anéis que apresentam fosfato.

Assim, já que grande parte do P inositol é adsorvido aos coloides do solo, espera-se que esse tipo de Po possa participar significativamente na nutrição de plantas somente em condições de extrema escassez, visto que os solos brasileiros geralmente são ácidos e com presença elevada de sítios adsortivos.

## 2.4 USO DE P<sub>O</sub> ORGÂNICO PELAS PLANTAS

O compartimento de Po pode ser a principal fonte de P disponível em solos altamente intemperizados (GAMA-RODRIGUES et al., 2014). No entanto, as plantas não conseguem usar esse Po de forma direta, pois as moléculas são muito grandes. Assim é preciso quebrar as moléculas grandes e disponibilizar o P na forma de ortofosfato. Para as plantas utilizarem parte do P presente no material orgânico ou na matéria orgânica é preciso que parte desse Po seja liberado do material, passando pelo processo de mineralização, que é a transformação do Po em Pi (MCLAUGHLIN et al., 2011).

O pH é um fator chave na regulação da quantidade e forma de P orgânico no solo (TURNER; BLACKWELL, 2013), embora alguns compostos orgânicos são relativamente pouco influenciados pelo pH. Por exemplo, a adsorção de glucose-6-fosfato (Po lábil) em óxidos metálicos é insensível à variação de pH (SHANG et al., 1992). No entanto, essa menor importância do pH não é somente com o glucose-6-fosfato, mas também com Po inositol (TURNER; BLACKWELL, 2013). Por isso, em solos ácidos, como os encontrados no Brasil, a participação do Po é importante. Já a disponibilidade do Pi, geralmente, é influenciada pelo pH do solo. Outro fator importante é a cultura utilizada. A demanda por P é diferente para cada espécie de planta e para cada genótipo. Culturas anuais necessitam de aplicações com mais intensidade, enquanto culturas perenes

necessitam de liberação lenta de nutrientes (MCLAUGHLIN, 2011). Assim, é recomendável a aplicação de fertilizantes solúveis para culturas anuais, e de fertilizantes de liberação lenta para culturas perenes (MCLAUGHLIN, 2011), desde que seja comprovada sua eficiência.

Alguns estudos têm mostrado que as plantas podem responder em algum momento à aplicação de Po não lábil (CHEN et al., 2004; STEFFENS et al. 2010). Chen et al. (2004) verificaram diminuição de P monoéster em solos ácidos após o cultivo com pinus quando comparado com o solo antes da implantação do cultivo. A mineralização de mio-inositol foi entre 18 e 100 % do total de P monoéster dentro do cultivo de *Pinus radiata*. No entanto, a variação de P diéster não apresentou uma tendência clara na mudança através de análise de  $P^{31}$  RMN. Isso pode ser devido a essa metodologia ser semiquantitativa e apresentar alguns problemas na quantificação de P diéster devido à menor presença no solo.

Steffens et al. (2010) aplicaram hexafitado de sódio e P solúvel na forma de  $Ca(H_2PO_4)_2$  e em determinadas plantas, a aplicação de Po fítico apresentou desempenho semelhante a adição ao P solúvel, como a colza (*Brassica napus*) e o tremoço branco (*Lupinus albus*). Já em espécies como o trigo (*Triticum aestivum*) e o centeio (*Secale cereale*), a aplicação de hexafitado de sódio apresentou desempenho em torno de 40% equivalente à aplicação com o tratamento com  $Ca(H_2PO_4)_2$ . Esse mecanismo de absorção de P pelas plantas deve ser acompanhado provavelmente pelo aumento da fosfatase.

George et al. (2006) verificaram que a atividade da fosfatase ácida na rizosfera do milho não foi afetada, sendo semelhante ao solo sem cultivo. Já para a crotalária (*Crotalaria grahamiana*) a atividade da enzima foi praticamente o dobro do que na rizosfera de milho. Neste experimente também houve uma depleção de Po extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (PoOH-I) nos tratamentos com crotalária e girassol mexicano (*tithonia*

spp). Já para o milho, não houve depleção de PoOH-I. Parte desse processo de maior ou menor utilização por determinada espécie de plantas se deve a características inerentes da planta, mas parte pode ser devido ao melhoramento genético aplicado, que acaba selecionando indivíduos mais produtivos e não os indivíduos que apresentam maior habilidade em absorver nutrientes em baixos teores de disponibilidade no solo.

Ainda existe dúvidas y sobre qual o mecanismo a planta utiliza para aumentar a quantidade de fosfatase na rizosfera. No entanto, plantas que apresentam aumento na exsudação de fosfatase ácida aumentaram a depleção de Po em relação à testemunha, sendo que a principal forma de depleção foi de fosfato monoéster (GEORGE et al., 2006). Mas, ainda não existe estudos que avaliam a utilização de diferentes fontes de Po em diferentes níveis de fósforo disponível no solo. Assim, espera-se que esses mecanismos que são envolvidos no aumento da disponibilidade de Po possam estar relacionados com o teor de P disponível para as plantas. Esses mecanismos podem ser mais utilizados em níveis de P disponível muito baixo, pois em níveis de P próximo ao adequado, espera-se pouco efeito da adição das fontes orgânicas de P.



### **3 HIPÓTESES:**

- O P-glicerolfosfato apresenta desempenho semelhante ao fosfato solúvel no desempenho de plantas no Argissolo vermelho Amarelo distrófico e inferior no Nitossolo Bruno.
- O P-fítico contribuiu melhor para a nutrição em teores iniciais de P disponível muito baixo ou baixo, do que em teores de P disponível alto no Argissolo vermelho Amarelo distrófico.
- O P-fítico não contribui para a nutrição de milho no Nitossolo Bruno, independente do teor inicial de P.
- A aplicação de P-glicerolfosfato e P solúvel serão detectadas principalmente pelas frações de Pi lábil. Já o P-fítico será detectado principalmente na fração orgânica extraída por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>.



## **4 OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o desempenho de fontes de P orgânico em comparação com uma fonte solúvel em dois solos com teores iniciais de P disponível no desenvolvimento de plantas de milho em casa de vegetação.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar a eficiência do P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em níveis de disponibilidade de P no solo pelas plantas de milho e trigo em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico e no desempenho de milho no Nitossolo Bruno;
- Avaliar o efeito dos teores iniciais de P do solo no desempenho de plantas de milho em comparação com P-fítico e P-glicerolfosfato em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico e em um Nitossolo Bruno;
- Avaliar a redistribuição das frações de P no solo após as aplicações de diferentes fontes de fósforo em cultivo de milho e trigo em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico e de milho em um Nitossolo Bruno.





## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 COLETA DO SOLO

O estudo foi realizado no Laboratório de Química e Fertilidade de Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC. Inicialmente foi realizado uma pesquisa em solos próximos a região, com teor de P disponível “muito baixo” (extrator Mehlich 1). Em seguida, foi realizado a coleta de cerca de 500 kg de solo um em uma área de mata nativa, localizada no município de Sangão (SC), região Sul do Estado de Santa Catarina (solo arenoso) e outro solo no município de Curitibanos (solo argiloso), região do Planalto Serrano de Santa Catarina. O solo coletado no município de Sangão, apresentava textura superficial arenosa e foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo distrófico e o solo coletado em Curitibanos foi classificado como Nitossolo Bruno (EMBRAPA, 2006). Na tabela 1 são apresentados as características químicas dos solos antes da aplicação dos tratamento (Tabela 1).

Tabela 1- Caracterização inicial dos dois solos do estudo na camada de 0-20 cm.

| Solo                     | pH-<br>H <sub>2</sub> O | pH-SMP  | argila                       | COT  | P dis <sup>(1)</sup> .        | K dis <sup>(1)</sup> |
|--------------------------|-------------------------|---------|------------------------------|------|-------------------------------|----------------------|
|                          | --1:1--                 | -1:1,5- | ----g kg <sup>-1</sup> ----- |      | -----mg kg <sup>-1</sup> ---- |                      |
| Argissolo <sup>(2)</sup> | 4,7                     | 5,9     | 258                          | 13,4 | 3,0                           | 135,7                |
| Nitossolo                | 4,4                     | 4,4     | 549                          | 21,0 | 1,7                           | 7,0                  |

<sup>(1)</sup> extrator Mehlich. <sup>(2)</sup> Argissolo = Argissolo Vermelho Amarelo distrófico  
Nitossolo = Nitossolo Bruno. Fonte: próprio autor, 2016.

### 5.2 CONSTRUÇÃO DOS NÍVEIS DE FERTILIDADE DO SOLO

Após a coleta dos solos, ambos foram secos em estufa com aeração forçada a 65° C, moídos e tamisados em peneira

com malha de 2 mm. Em seguida, os solos foram incubados com calcário (PRNT 100%) para atingir pH para 5,5 por cerca de 30 dias. Semanalmente o solo era revolvido e adicionado água a capacidade de campo a 80%. Para a construção dos níveis de P disponível do solo, foi realizado uma incubação prévia com subamostras de solos incubadas com diferentes doses de P solúvel. Esse processo foi realizado em amostras com 500 g de solo em sacos plásticos e com adições de doses crescentes de P na forma  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , permanecendo incubado a 80% da capacidade de campo por cerca de 20 dias até a completa reação do P solúvel com o solo. Em seguida foi realizado análise de P disponível e foi realizado uma regressão com as doses de P adicionado e o teor de P disponível (Apêndice A). Foi utilizado o equivalente 0, 10, 30 e 60 mg de P por  $\text{kg}^{-1}$  de solo para atingir diferentes teores iniciais de P classificados como “muito baixo”, “baixo”, “médio” e “alto” no Argissolo e 0, 80, 150, 250 mg de P por  $\text{kg}^{-1}$  de solo para o Nitossolo, respectivamente, para atingir os mesmos teores de P no solo (Apêndice A). Assim, foram adicionadas doses de P em sacos com 30 kg de solo e criados os diferentes níveis de P disponível, segundo o CQFS-RS/SC (2004): 1 – teor de P “muito baixo” (sem adição de superfosfato); 2 – teor de P “baixo”; 3 - teor de P “médio” e 4 – teor de P “alto”. Foi utilizado superfosfato triplo como fonte de P. O superfosfato triplo foi moído em gral de ágata para se ter um menor tamanho de partícula e para uma reação mais rápida com o solo. Em seguida o solo foi incubado por mais 30 dias para a completa reação do fosfato com o solo com 80 % da capacidade de campo. A cada 3 dias, o solo era pesado, sua umidade era avaliada e o solo era revolvido para uma adequada reação do fosfato e para trocas gasosas.

### 5.3 APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS

Após a construção de diferentes teores de P disponível no solo, foi realizado a aplicação das diferentes fontes de P. Assim, o fator 1 constou dos diferentes níveis de P disponível e o fator 2 constou de 3 fontes de P mais uma testemunha, com os seguintes tratamentos: 1 - testemunha, sem adição de fonte de P; 2- adição de P fítico (reagente PA); 3 - adição de P glicerolfosfato (reagente PA) e 4 - adição de fonte solúvel de P ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) (reagente PA). Antes da aplicação das fontes de P no solo, foi realizado uma digestão sulfúrica dos reagentes segundo metodologia proposta por Tedesco et al. (1995), quantificado o teor de P com 5 repetições pelo método descrito por Murphy & Rhiley (1962). A quantidade de P presente nos reagentes PA foi de 185,2; 88,7 e 193,2 g kg de P no ácido fítico, P glicerolfosfato e no P solúvel, respectivamente. O ácido fítico e o P glicerolfosfato foram dissolvidas em balão volumétrico, sendo que a quantidade final de P adicionado foi uma dose equivalente a 125 kg de  $\text{P}_2\text{O}_5$   $\text{ha}^{-1}$  aplicado em 5 ml de solução concentrada, de forma localizada próximo às sementes. Já a adubação de fonte solúvel de P ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) foi aplicada de forma sólida próximo às sementes. As unidades experimentais constituíram de vasos com 3 kg de solo seco, com quatro repetições para o fator 1 (níveis de disponibilidade de P) e 4 repetições para o fator 2 (fontes de P). Para o cultivo com o Nitossolo Bruno foi adicionado  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  como fonte de P solúvel, visto que no estudo do Argissolo Vermelho, que foi realizado inicialmente, a fonte solúvel de P ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) não solubilizou em meio líquido. Assim, para o estudo posterior, utilizou-se uma fonte de P que é possível de ser aplicado na forma líquida.

#### 5.4 CULTIVO DE MILHO E TRIGO NO ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO

No Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, foi semeado milho (*Zea mays*), cultivar 30F53 Pioneer HR (com duas plantas por vaso). Foi feito o desbaste aos 5 dias após a emergência, deixando uma planta por vaso. O cultivo ocorreu durante 33 dias.

O solo foi mantido a 80% da capacidade de campo, em casa de vegetação com temperatura variando entre 16 – 26 °C. Foi adicionado 60 mg de N kg<sup>-1</sup> de solo e 30 mg de K<sup>-1</sup> em todos os tratamentos após 7 dias de emergência. Após os 33 dias de cultivo, foi realizado a coleta da parte aérea e das raízes, colocando-os em estufa com ar forçado a 65 °C até peso constante. Em seguida foi quantificada a produção de matéria seca. O tecido foi moído e submetido a digestão sulfúrica (TEDESCO et al., 1995). Foi realizado análise de P do tecido da parte aérea e da raiz, e análise de Ca, Mg, K e N da parte aérea, (TEDESCO et al., 1995) (Apêndice B-I). Uma amostra de solo foi coletado em cada vaso após o cultivo para análises de fracionamento químico de P. No momento da coleta de solo, foi observado pequenos grumos de (Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) e, por isso, realizou-se mais um cultivo sucessivo com trigo no mesmo solo. Assim o solo foi seco, pesou-se 2,5 kg de solo e cultivou-se trigo (*T. aestivum*) cultivar Quartzo, sendo a parcela proveniente com vaso de 2,5 kg, com duas plantas de trigo por vaso em cultivo sucessivo, em casa de vegetação com temperatura variando entre 16 – 26 °C. O solo também foi mantido a 80 % da capacidade de campo. Foi adicionado 60 mg de N e de K por kg<sup>-1</sup> de solo em todas as unidades experimentais. Após 33 dias, foram realizadas as mesmas análises já realizadas para o cultivo do milho (matéria seca, e teores de nutrientes no tecido). Também foi reservado amostras de solo para análises de fracionamento químico de P descritas abaixo.

## 5.5 CULTIVO DE MILHO NO NITOSSOLO BRUNO

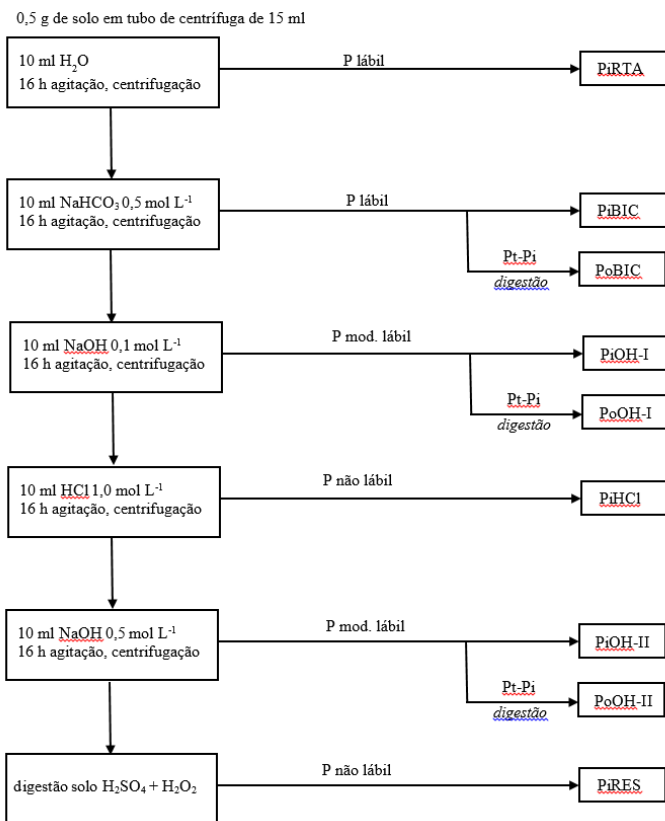
O solo foi mantido a 80% da capacidade de campo, em casa de vegetação com temperatura variando entre 16 – 26 °C. Foi adicionado 60 mg de N kg de solo e 103 mg de K em todos os tratamentos (quantidade equivalente à quantidade de K presente no tratamento na fonte solúvel). Foi cultivado milho (*Zea mays*), cultivar 30F53 Pioneer HR durante 39 dias, sendo a parcela composta por uma planta por vaso. Após os 39 dias de cultivo, foi realizado a coleta da parte aérea e das raízes, submetendo-os em estufa com ar forçado a 65 °C até peso constante. As avaliações foram as mesmas do cultivo do milho e do trigo.

## 5.6 FRACIONAMENTO QUÍMICO DE FÓSFORO

O fracionamento químico de P foi realizado nas amostras de solo após os cultivos de milho e de trigo, conforme metodologia proposta por Hedley et al. (1982), com as modificações propostas por Condron e Goh (1989), descrita resumidamente a seguir: amostras de 0,5 g de solo foram submetidas à extração em sequência com resina trocadora de ânions (PiRTA); P inorgânico e orgânico extraído com  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiBIC e PoBIC); P orgânico e inorgânico extraído com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-I e PoOH-I); P inorgânico extraído com HCl 1 mol L<sup>-1</sup> (PiHCl) e P inorgânico e orgânico extraído com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-II e PoOH-II). Após as extrações, o solo remanescente foi seco em estufa à 50°C e submetido à digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$  + para a determinação do P residual (PRES), conforme descrito por Gatiboni et al., (2013b). O Pi dos extratos alcalinos de  $\text{NaHCO}_3$  e NaOH foi determinado pelo método proposto por Dick e Tabatabay (1977). Nesses extratos alcalinos, o P total foi determinado por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico, em autoclave

durante 3 horas de digestão, sendo o Po obtido pela diferença entre P total e o Pi. O PiRTA e PiHCl foi determinado segundo Murphy e Riley (1962).

Figura 1 - Esquema de fracionamento químico de fósforo proposto por Hedley et al., (1982), com modificações de Condron e Goh (1989).



Fonte: adaptado de Gatiboni et al., 2013b.

## 5.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental nos cultivos realizados nos dois solos foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial, com teores iniciais de P no solo como fator 1, e diferentes fontes de P como fator 2, com quatro repetições (4x4). Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando os efeitos foram significativos, comparou-se as médias entre os teores iniciais e entre as fontes dentro de cada teor inicial pelo teste de Scott-knott ao nível mínimo de significância de 5% utilizando-se o programa SISVAR (2015).





## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 CULTIVO DE MILHO EM ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO

Não se verificou interação entre os teores iniciais de P disponível e as fontes de P utilizadas no estudo para produção de massa seca de milho e para fósforo no tecido (raiz + parte aérea). Somente ocorreram efeitos simples dos níveis e das fontes utilizadas (Tabela 2).

Em relação aos teores iniciais de P no solo, os maiores valores de massa seca de milho foram verificados nos teores iniciais de P disponível “médio” e “alto” (Tabela 2). Os teores de P disponível “muito baixo” e “baixo” apresentaram valores semelhantes de massa seca. Isso pode ser justificável devido aos teores de P disponível estarem em faixas diferentes (“muito baixo” e “baixo”), mas apresentarem teores de P disponível muito próximos (teores iniciais de 3,0 e 5,1, respectivamente). Essa maior produção de biomassa nos níveis de P disponível mais elevados está associada com a maior disponibilidade de P (ERNANI et al., 2001), indicando que o P estava em níveis restritivos no solo original.

Com relação às fontes de P, o P-glicerolfosfato apresentou maiores valores de massa seca de milho, seguido do P-solúvel e P-fítico (Tabela 2). Porém, esses maiores valores no P-glicerolfosfato são, provavelmente, devido a incompleta solubilização da fonte solúvel ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) no tratamento P-solúvel, já que foram observados grumos de fosfato de cálcio no solo durante o cultivo das plantas.

Aliado a isso, também o P-glicerolfosfato teve um desempenho superior à testemunha e P-fítico devido ao tipo de Po presente (P orgânico lábil). Assim, a hipótese é que parte desse Po foi rapidamente mineralizado e disponibilizado no solo às plantas, visto que a degradação de Po lábil é rápida

(BOWMAN; COLE, 1976). Além disso, o processo de adsorção na forma de glicerolfosfato é menos intenso do que as fontes de Po não lábeis, como o P do fitato (BOWMAN; COLE, 1976). Já no tratamento P-fítico, com Po não lábil, verificou-se desempenho inferior ao P-glicerolfosfato. Acredita-se que essas fontes orgânicas não lábeis se acumulam no solo devido à sua resistência ao ataque microbiano (DOOLETTE et al., 2010). Normalmente a mineralização de P fítico (com a utilização de reagente PA) ao longo de 4 semanas é muito pequena e, em alguns casos, sendo de apenas 12 % do adicionado (DOOLETTE et al., 2010). Assim, apenas uma pequena parte do P adicionado na forma de fitato foi mineralizada a ortofosfato em um mês, o que é verificado pelo baixo desempenho das plantas nesse tratamento.

Semelhante aos valores de massa seca, os teores de P no tecido foram maiores nos níveis de P disponível “médio” e “alto” (Tabela 2). Já o teor inicial “muito baixo” e “baixo” tiveram valores inferiores e semelhantes entre si. Em relação as fontes de P adicionado, o P-glicerolfosfato e P-solúvel apresentaram os maiores teores de P no tecido.

Embora a massa seca das plantas de milho foi maior no P-glicerolfosfato, os teores de P no tecido foram semelhantes entre o P-solúvel e o P-glicerolfosfato (Tabela 2). Essa semelhança pode ser devido ao efeito de diluição (BOLLAND et al., 2006), já que a produção de biomassa foi diferente entre esses dois tratamentos. Já os teores de P na testemunha e P-fítico foram semelhantes e inferiores aos demais tratamentos. Cabe ressaltar que os teores de Ca, Mg, N e K não apresentaram grandes modificações com as aplicações dos tratamentos (Apêndice D-F).

Os maiores valores de P absorvido pelo milho foram encontrados nos níveis de P disponível “médio” e “alto”, apresentando cerca de 5 mg de P absorvido por vaso (Tabela 2). Já nos níveis de P “muito baixo” e “baixo” apresentaram valores

de P absorvido semelhantes, em torno de 3,5 mg por vaso. Isso era esperado, visto que a resposta da planta à aplicação de fósforo aumenta com o incremento da disponibilidade de nutrientes até o nível crítico ( $12 \text{ mg kg}^{-1}$ ), pois acima disso os incrementos são menores ou inexistentes (CQFS - RS/SC, 2004; BOLLAND et al., 2006; MACOLINO et al., 2014).

Por outro lado, os valores de P absorvido em função das fontes de P foram maiores para o P-glicerolfosfato, seguido pelo tratamento P-solúvel (Tabela 2). Já o tratamento P-fítico foi superior apenas à testemunha (sem adição de P).

Os maiores valores de P absorvido no tratamento P-glicerolfosfato podem ser devido a incompleta solubilização da fonte solúvel com  $(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2)$ , a qual foi aplicada na forma sólida próximo às raízes, pois após a coleta das raízes verificou-se a presença de grumos esbranquiçados, indicando que parte desse P pode ter ficado insolúvel. Por outro lado, o P-fítico é uma fonte de Po não lábil e que interage fortemente com os coloides do solo, ficando quase que totalmente adsorvido ao solo (SHANG et al., 1992; BERG; JOERN, 2006; JOHNSON et al., 2012; SHANG et al., 2013). Isso pode ser o fator preponderante da ausência de resposta em todos os parâmetros avaliados, principalmente quando em solos intemperizados como os desse estudo. Mesmo em ambientes com aplicação de bactérias e enzimas como as fitases, o desempenho das plantas com aplicação de P fítico é inferior àquele com fontes inorgânicas (HAYNES; RICHARDSON; SIMPSON, 2000; RICHARDSON et al., 2001; DOOLETTE et al., 2010).

McGill e Colle (1981) propõem que a mineralização do Po pode ser realizada por via bioquímica. Assim, em níveis de P disponível “muito baixo” e “baixo”, pela carência de P, os microrganismos e as plantas podem exsudar enzimas para retirar somente o Po da matéria orgânica do solo e, assim, o elemento pode ser utilizado pelas plantas e microrganismos. No entanto, esse fato depende de muitas variáveis, como a planta que

apresente esses mecanismos, o tipo de solo, as condições físico-químicas do solo e a presença de microrganismos (RICHARDSON et al., 2001; SHEN et al., 2011; MORO et al., 2015). Steffens et al. (2010) verificaram que o desempenho de determinadas culturas foi semelhante para as fontes de P fítico e P solúvel com  $((\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2)$ . No entanto, em determinadas espécies o desempenho foi inferior em relação à fonte solúvel, o que é esperado, já que o P fítico é um P orgânico de baixa labilidade e dependente de um processo biológico ativo que promova sua mineralização. Outro trabalho mostrou que determinadas plantas como, o pinus, têm maior habilidade de utilizar P monoéster do solo (P orgânico não lábil) em relação ao azevém (CHEN et al., 2004).

Tabela 2- Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo no tecido de raiz e parte aérea de milho nos teores iniciais de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,55       | 1,43     | 6,27       | 1,85      | 2,52 b |
| Baixo                                      | 0,86       | 1,86     | 5,39       | 2,67      | 2,69 b |
| Médio                                      | 1,11       | 2,14     | 7,96       | 3,42      | 3,66 a |
| Alto                                       | 1,43       | 3,27     | 5,12       | 3,82      | 3,41 a |
| Média                                      | 0,99 C     | 2,18 B   | 6,18 A     | 2,94 B    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,92       | 0,96     | 1,41       | 1,37      | 1,16 b |
| Baixo                                      | 1,00       | 1,11     | 1,24       | 1,22      | 1,14 b |
| Médio                                      | 1,18       | 1,18     | 1,38       | 1,38      | 1,28 a |
| Alto                                       | 1,26       | 1,29     | 1,47       | 1,25      | 1,32 a |
| Média                                      | 1,09 B     | 1,13 B   | 1,37 A     | 1,31 A    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,49       | 1,38     | 8,82       | 2,62      | 3,33 b |
| Baixo                                      | 0,86       | 2,08     | 6,63       | 3,33      | 3,22 b |
| Médio                                      | 1,29       | 2,48     | 10,93      | 4,53      | 4,81 a |
| Alto                                       | 1,81       | 4,25     | 7,60       | 4,75      | 4,60 a |
| Média                                      | 1,11 D     | 2,55 C   | 8,50 A     | 3,81 B    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

## 6.2 CULTIVO SUCESSIVO COM TRIGO

Novamente, não houve interação dos teores iniciais de P disponível em função das fontes de P na massa seca (Tabela 3). A massa seca de trigo foi maior no teor “alto” (Tabela 3), semelhante ao cultivo com milho (Tabela 2). Os teores iniciais de P disponível “baixo” e “médio” apresentaram resultados semelhantes entre si, sendo superior ao teor inicial de P “muito baixo”. Esses valores de massa seca de trigo no teor “alto” de disponibilidade de P já era esperado, visto que o trigo responde positivamente a adubação com P (NOACK et al., 2014).

Comparando as fontes de P, diferente do primeiro cultivo, o P-solúvel teve os maiores valores de massa seca de trigo (3,75 g vaso<sup>-1</sup>) comparado com os demais tratamentos, sendo 67 % superior ao P-glicerolfosfato. Isso indica que neste cultivo, ao contrário do ocorrido no primeiro, houve a solubilização do P do fosfato de cálcio. Já o P-glicerolfosfato teve valores intermediários e superiores ao P-fítico e à testemunha. O tratamento P-fítico teve valores semelhantes aos de massa seca do tratamento testemunha. Os valores de massa seca do P-glicerolfosfato foram 68% superiores ao P-fítico, mesmo após o segundo cultivo, evidenciando a pouca contribuição do P-fítico ao longo dos cultivos. Embora em alguns casos a fonte de P fítico possa ser utilizada pelas plantas (CHEN et al., 2004; STEFFENS et al., 2010), isso ocorre em baixas quantidades (HAYNES; RICHARDSON; SIMPSON, 2000), mostrando que a absorção de P é limitada pela baixa capacidade da planta e organismos em solubilizá-lo (BOLLAND et al., 2006).

Os resultados da concentração de P no tecido de trigo tiveram interação entre os teores de P disponível e as fontes de P (Tabela 3). Em geral, os maiores valores de P no tecido ocorreram nos níveis “médio” e “alto” de P disponível e no P-solúvel, corroborando com os dados de massa seca do tecido. Avaliando de forma individual, na testemunha e no P-

glicerolfosfato, os maiores valores de P no tecido foram nos teores “médio” e “alto”, o que era esperado. No P-solúvel os maiores valores foram observados no teor “baixo”. Já no P-fítico, não houve diferença entre os teores iniciais de P. Geralmente ocorre aumento na concentração de P no tecido com o aumento da disponibilidade de P no solo. No entanto, Noack et al. (2014) observaram maior concentração de P no colmo de tecido de trigo em taxa de aplicação baixa no solo, do que em aplicação com taxa média e alta no solo, que pode ser devido a efeitos de diluição. Neste mesmo trabalho, os autores consideraram que teores adequados no grão são entre 0,3-0,5 % de P, que foi encontrado nas taxas de aplicação baixa e alta, sendo diferente da taxa média, mostrando que o incremento de P no tecido não aumenta linearmente com o incremento de P no solo.

Comparando as fontes dentro de cada teor inicial, nos teores “muito baixo” e “baixo”, os maiores valores de P no tecido da parte aérea de trigo foram observados no P-solúvel. Já nos teores “médio” e “alto” os maiores valores de P no tecido foram observados no P-glicerolfosfato e no P-solúvel. A concentração dos demais nutrientes na parte aérea do trigo pode ser verificada nos apêndices L-M.

Esses dados reforçam os resultados de massa seca de parte aérea de trigo, pois verifica-se que além de propiciarem uma maior produção de biomassa, o P-solúvel e o P-glicerolfosfato incrementaram o teor de P no tecido da parte aérea em relação ao P-fítico e a testemunha. Isso pode ser explicado pela pobre habilidade das plantas em utilizar o P das fontes orgânicas de baixa labilidade, resultando em menores valores de concentrações de P no tecido e, em geral, diminuindo a massa seca da planta (RICHARDSON et al., 2001).

A quantidade de P absorvido pelas plantas de trigo apresentou influência dos teores de P disponível no solo e das fontes (Tabela 3), semelhante aos valores de P no tecido. De modo geral, os maiores valores de P absorvido ocorreram no teor

“alto” e na fonte solúvel. Isso é esperado visto que a massa seca e o teor de P no tecido foram maiores nesses tratamentos.

A absorção de P na testemunha foi maior nos níveis “médio” e “alto” (Tabela 3). Já no tratamento P-fítico, não houve diferença nos teores de P no tecido entre os níveis de P disponível. No P-glicerolfosfato o maior valor de P absorvido foi no teor “alto”. Já no P-solúvel, o maior valor de P absorvido ocorreu nos teores “baixo” e “alto”. Ao comparar-se as fontes de P dentro de cada teor inicial de disponibilidade, verifica-se que os maiores valores de P absorvido foram observados no P-solúvel para os teores “muito baixo”, baixo” e “médio”. Para o teor “alto”, os maiores valores de P absorvido foram no P-glicerolfosfato e P-solúvel. Esses maiores valores de P absorvido no P solúvel corroboram com os valores de massa seca e teor no tecido, como já apresentado anteriormente, pois a quantidade de P absorvido está diretamente relacionada com a produção de massa seca e a disponibilidade de P.

A quantidade de P absorvido do tratamento P-fítico foi semelhante àquela da testemunha. Isso se deve pelo fato do P-fítico, provavelmente, estar associado com os minerais do solo (BERG; JOERN, 2006; SHANG et al., 2014). Richardson et al. (2001) mostraram que o teor de P total de plantas, fornecido como inositol-hexakisfosfato, que é uma fonte de Po não lábil, em plantas cultivadas em ágar, foi entre 20% e 34% em relação a mudas que receberam uma quantidade equivalente de Pi, ao passo que em areia-vermiculita, o teor total de P das plantas que receberam inositolhexakisfosfato foi somente entre 5 e 10% daquele das plantas controle, mostrando que em substratos ou solos, esse tipo de P pode apresentar inúmeras reações com os constituintes minerais, o que acaba diminuído o potencial de uso de P pelas plantas e microrganismos. Cabe ressaltar que a produção de massa seca da planta, teor de P no tecido e P absorvido (raiz + parte aérea) tanto no cultivo de milho quanto



no de trigo apresentaram resultados semelhantes separando os teores em parte aérea e raiz (APÊNDICES (B-C;G-H).

Tabela 3 - Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo no tecido de raiz e parte aérea de trigo nos teores de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico em cultivo sucessivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,60       | 0,77     | 1,84       | 3,22      | 1,63 c |
| Baixo                                      | 0,96       | 1,32     | 1,86       | 3,83      | 1,99 b |
| Médio                                      | 1,28       | 1,34     | 1,88       | 3,69      | 2,05 b |
| Alto                                       | 1,90       | 1,92     | 3,41       | 4,17      | 2,85 a |
| Média                                      | 1,18 C     | 1,34 C   | 2,56 B     | 3,75 A    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,67 bB    | 0,74 aB  | 0,99 bB    | 1,88 bA   | 1,07 b |
| Baixo                                      | 0,58 bB    | 0,72 aB  | 0,90 bB    | 2,22 aA   | 1,11 b |
| Médio                                      | 1,16 aB    | 0,98 aB  | 1,49 aA    | 1,66 bA   | 1,32 a |
| Alto                                       | 1,22 aB    | 1,02 aB  | 1,80 aA    | 1,71 bA   | 1,44 a |
| Média                                      | 0,91 C     | 0,87 C   | 1,29 B     | 1,87 A    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,40 bC    | 0,56 aC  | 1,85 bB    | 6,24 bA   | 2,26 b |
| Baixo                                      | 0,57 bB    | 0,93 aB  | 1,64 bB    | 8,13 aA   | 2,81 b |
| Médio                                      | 1,48 aC    | 1,35 aC  | 2,93 bB    | 6,02 bA   | 2,94 b |
| Alto                                       | 2,27 aB    | 1,98 aB  | 6,08 aA    | 7,25 aA   | 4,39 a |
| Média                                      | 1,18 C     | 1,20 C   | 3,12 B     | 6,91 A    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

## 6.3 FRAÇÕES DE P NO ARGISSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO

### 6.3.1 Primeiro cultivo - milho

Os valores de Pi extraídos pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (PiBIC) foram influenciados pelos teores e pelas fontes de P após o primeiro cultivo com milho (Tabela 4).

Os valores de PiRTA foram maiores nos níveis “médio” e “alto” no P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel, sendo que nos teores “muito baixo” e “baixo” foram semelhantes (Tabela 4). Já a testemunha teve os maiores valores de PiRTA no teor “alto”, sendo que os demais teores foram semelhantes. Os tratamentos P-glicerolfosfato e o P-solúvel apresentaram maiores valores nos teores “muito baixo”, “baixo” e “médio”. Já no teor “alto” o tratamento P-solúvel foi superior aos demais.

Os maiores valores de PiRTA no P-glicerolfosfato e no P-solúvel após o primeiro cultivo refletiram no melhor desempenho das plantas de trigo no segundo cultivo (Tabela 2), mostrando que o extrator resina é um bom parâmetro da disponibilidade de P para as plantas (SCHOENAU; HUANG, 1991). Essa predição do PiRTA refere-se somente ao Pi parte inorgânica de P disponível, mostrando que uma parcela significativa do P-glicerolfosfato foi mineralizado e transformado em Pi. O P-glicerolfosfato é rapidamente mineralizado a Pi quando adicionado ao solo (BOWMAN; COLE, 1976). Entretanto, o tratamento P-fítico foi semelhante à testemunha, sendo pouco significativo na disponibilidade de Pi para o solo. Como o extrator reflete somente parte lábil do Pi, isso indica que o P-fítico não foi mineralizado ou foi adsorvido em frações mais recalcitrantes.

O teor de PiBIC foi maior no teor “alto” em todos os tratamentos (Tabela 4). Já o teor “médio” foi superior aos demais teores iniciais de P disponível. O P-glicerolfosfato e o P-solúvel

tiveram os maiores valores de PiBIC nos teores “baixo”, “médio” e “alto”. Já no teor “muito baixo”, o P-glicerolfosfato foi superior aos demais tratamentos.

Tabela 4 - Fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PiBIC) após o cultivo do milho nos teores de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol<br>PiRTA | P-solúvel | Média   |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|---------|
| M baixo | 2,61 bB    | 2,87 bB  | 4,96 bA             | 6,96 bA   | 4,42 b  |
| Baixo   | 4,22 bB    | 3,15 bB  | 6,35 bA             | 7,26 bA   | 5,17 b  |
| Médio   | 4,78 bB    | 5,66 aB  | 11,80 aA            | 14,81 aA  | 9,23 a  |
| Alto    | 8,00 aB    | 7,96 aB  | 8,84 aB             | 15,61 aA  | 10,1 a  |
| Média   | 4,90 C     | 4,88 C   | 7,98 B              | 11,22 A   |         |
| PiBIC   |            |          |                     |           |         |
| M baixo | 4,40 cB    | 4,22 dB  | 7,94 cA             | 4,47 dB   | 5,26 d  |
| Baixo   | 4,47 cC    | 6,33 cB  | 8,94 cA             | 8,31 cA   | 7,01 c  |
| Médio   | 9,43 bB    | 10,26 bB | 13,53 bA            | 12,53 bA  | 11,44 b |
| Alto    | 13,90 aB   | 14,15 aB | 16,88 aA            | 17,25 aA  | 15,54 a |
| Média   | 8,05 C     | 8,74 C   | 10,64 B             | 11,82 A   |         |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Esses valores de PiBIC apresentam resultados semelhantes aos do extrator PiRTA (Tabela 4) e refletem a maior disponibilidade de Pi nos níveis maiores de disponibilidade nos tratamentos P-glicerolfosfato e P-solúvel. A extração com  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  é uma variação do método de Olsen, que foi inicialmente designado para avaliar o Pi em solos calcários em análises de rotina (BOWMAN; COLE, 1976; BAIR; DAVENPORT, 2013). Embora esse extrator foi calibrado inicialmente para solos calcários, sua utilização na técnica do fracionamento químico de P fornece um bom parâmetro da disponibilidade de P também em solos ácidos (ANDERSON et al., 2015), pois extrai principalmente o P ligado fracamente aos coloides, em especial ligado a Fe e Al (RYDEN; SYERS, 1977; SILVA; RAIJ, 1999).

Os teores de Pi extraído por  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  (PiOH-I) não apresentaram interação entre os níveis de P disponível e as fontes de P adicionado (Tabela 5). Os maiores valores de PiOH-I foram encontrados no teor “alto”, seguido pelo teor “médio”. Para o teor “muito baixo” verificou-se valores inferiores àqueles dos demais tratamentos. Verificou-se uma diferença em todos os níveis de P disponível no solo. Isso se deve, principalmente, pela adição do P-solúvel para a construção dos diferentes níveis de P disponível no solo, aliado a alta adsorção do P nessa fração, principalmente em solos intemperizados. Em solos com aplicação de P, o elemento tende a ser adsorvido em todas as frações (SCHMITT et al., 2013), mas com diferentes magnitudes, de acordo com o tamanho do compartimento. Em solos intemperizados, a fração extraída com  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  é uma fração significativa na quantidade de P retido (ZHENG et al., 2002; BÜNEMANN et al., 2004), principalmente devido à grande quantidade de oxihidróxidos presentes.

Os teores de PiOH-I foram maiores nos tratamentos P-solúvel e P-glicerolfosfato (Tabela 5). O tratamento P-fítico foi superior apenas à testemunha, sem adição de P. Esses resultados

evidenciam que os tratamentos com aplicação do P-solúvel e P-glicerolfosfato apresentaram maior adsorção, evidenciando a possível transformação do P-glicerolfosfato em  $P_i$ . Entretanto, o P-fítico não apresentou o mesmo desempenho do P-glicerolfosfato, sendo que uma proporção de P-fítico pode ser adsorvida aos colóides do solo, não sendo ou sendo pouco mineralizado. O extrator com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> é adequado para extrair o P fítico, (TURNER; LEYTEM, 2004), embora os extratores alcalinos e os ácidos nem sempre consigam extrair essa forma de P (BOWMAN; COLE, 1978; CONDRON et al., 1990b).

O teor de  $P_{iOH-II}$  foi maior nos teores de P disponível “alto” no P-fítico e P-solúvel (Tabela 5). Já no P-glicerolfosfato, os maiores valores foram encontrados nos teores “médio” e “alto”. Para a testemunha, os maiores valores foram observados nos teores iniciais “muito baixo”, “médio” e “alto”.

Considerando as fontes dentro de cada nível, somente no teor “médio” o tratamento P-glicerolfosfato foi maior que as demais fontes de P (Tabela 5). Para as demais fontes, não houve diferenças entre os tratamentos para a fração de  $P_{iOH-II}$ . Houve pouca variação entre as fontes adicionadas pois parte do P adicionado pode ter sido extraída pelos extratores anteriores do fracionamento. Assim, quando são feitas aplicações de P no solo, seja na forma de fertilizantes ou esterco, ocorre um reequilíbrio entre o P e os diversos compartimentos existentes, fazendo com que o incremento ocorra em diversos compartimentos, mas principalmente nas frações de P mais lábeis e moderadamente lábil, extraído pelo NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (BUEHLER et al., 2002; GUARDINI et al., 2012; CREWS; BROOKES, 2014; CREWS; BROOKES, 2014; GUARDINI et al., 2012; SCHMITT et al., 2014).

Tabela 5 - Fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-I) e NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-II) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média   |
|---------|------------|----------|------------|-----------|---------|
| PiOH-I  |            |          |            |           |         |
| M baixo | 26,09      | 26,46    | 33,76      | 34,52     | 30,21 d |
| Baixo   | 33,51      | 33,67    | 41,58      | 40,06     | 37,20 c |
| Médio   | 41,70      | 45,36    | 56,69      | 50,02     | 48,44 b |
| Alto    | 52,91      | 53,08    | 59,47      | 52,79     | 54,56 a |
| Média   | 38,55 B    | 39,63 B  | 47,87 A    | 44,35 A   |         |
| PiOH-II |            |          |            |           |         |
| M baixo | 14,64 aA   | 14,18 bA | 12,92 bA   | 12,22 cA  | 13,49 b |
| Baixo   | 12,11 bA   | 14,11 bA | 14,19 bA   | 12,80 cA  | 13,30 b |
| Médio   | 15,57 aB   | 14,45 bB | 18,68 aA   | 16,03 bB  | 16,18 a |
| Alto    | 16,14 aA   | 17,06 aA | 17,30 aA   | 18,80 aA  | 17,33 a |
| Média   | 14,62 A    | 14,95 A  | 15,77 A    | 14,96 A   |         |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os teores de PiHCl apenas apresentaram efeitos para os teores iniciais de P no solo (Tabela 6). Todos os teores iniciais foram diferentes, apresentando incremento linear com o aumento da disponibilidade de P. Esses teores variaram entre 1,4

até 4 mg kg<sup>-1</sup> desde o teor inicial “muito baixo” até o teor “alto”. Os incrementos de PiHCl estão relacionados com a taxa de acúmulo de P no solo (SCHMITT et al., 2014), aliado a elevados valores de pH (DAROUB et al., 2000) e teores de Ca (TURNER; LEYTEM, 2004). No entanto, esses valores são condizentes com solos intemperizados do sul do Brasil (BOITT, 2014).

Os valores de PRES apenas foram influenciados pelas fontes de P (Tabela 6). Os maiores valores de PRES foram encontrados no solo com P-fítico. Isso mostra que essa fonte de P é muito pouco utilizada pela planta de milho, o que é corroborado pelos dados de massa seca e pelo P absorvido (Tabela 2). Isso também mostra que os extratores anteriores do fracionamento são pouco eficientes em extrair esse P devido à sua alta interação com o solo. Isso evidencia que o P fítico pode ser utilizada apenas em casos extremos, pois essa fonte fica altamente adsorvida aos coloides do solo. Além disso, com os resultados do fracionamento demonstra-se que os extratores utilizados pelo fracionamento químico, tanto alcalinos como ácidos, foram pouco efetivos na quantificação do P-fítico, sendo que apenas na fração PRES foi detectada a presença dessa fração. Bowman e Cole (1978) também evidenciaram a incompleta extração de P fítico com extratores alcalinos e ácidos.

Tabela 6 - Fósforo inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup> (PiHCl) e fósforo residual (PRES) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol<br>PiHCl | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|--------|
| M baixo | 1,53       | 1,26     | 1,49                | 1,34      | 1,41 d |
| Baixo   | 2,42       | 1,71     | 2,60                | 2,49      | 2,30 c |
| Médio   | 2,89       | 2,92     | 3,30                | 2,61      | 2,92 b |
| Alto    | 3,42       | 3,52     | 4,71                | 4,24      | 3,97a  |
| Média   | 2,57       | 2,35     | 3,02                | 2,67      |        |
| PRES    |            |          |                     |           |        |
| M baixo | 138,22     | 177,48   | 131,40              | 104,52    | 137,91 |
| Baixo   | 133,42     | 141,99   | 151,28              | 122,08    | 137,19 |
| Médio   | 125,55     | 156,86   | 136,64              | 138,22    | 139,32 |
| Alto    | 122,61     | 141,31   | 116,41              | 126,12    | 126,61 |
| Média   | 129,95 B   | 154,41 A | 133,93 B            | 122,74 B  |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico=P fítico; P-solúvel= P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os valores de PoBIC foram maiores nos teores iniciais “muito baixo” e “médio” no tratamento P-glicerolfosfato e no P-solúvel (Tabela 7). Já a testemunha e o P-fítico não tiveram diferença no PoBIC em relação aos teores iniciais de P disponível.



Avaliando as fontes dentro de cada teor inicial verifica-se que nos teores de P disponível “baixo” e “alto” não houve diferenças no PoBIC. Já no teor inicial de P disponível “muito baixo”, os tratamentos P-glicerolfosfato e o P-solúvel apresentaram maiores valores de PoBIC. e no nível “médio”, os maiores valores ocorreram nos tratamentos P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel.

Com os resultados não se verifica uma tendência clara, mas em níveis de P “muito baixo” e com aplicação de fonte solúvel houve uma maior mineralização de Po quantificado pelo  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (Tabela 7) Isso mostra que a mineralização de Po pode ter dois mecanismos distintos. Em solos com baixo teor de P disponível, pode estar ocorrendo a mineralização (MCGILL; COLE, 1976). Já em teores de P “alto”, os maiores valores de P disponível podem contribuir com a ativação da biomassa microbiana (HEUCK et al., 2015) e aumentar a mineralização, como visto nos tratamentos P-solúvel e P-glicerolfosfato. Entretanto, o P-fítico contribui muito pouco com a mineralização de Po (CHEN et al., 2004) e parece estar mais relacionado com a relação mineralógica do solo (STEWART; TIESSEN, 1987).

O teor de PoOH-II não foi afetado nem pelos teores iniciais de P nem pelas fontes de P (Tabela 7), sendo que a média para todos os tratamentos e níveis foi de  $28,47 \text{ mg kg}^{-1}$ . Isso evidencia a pouca influência do milho em utilizar parte do Po presente no solo, principalmente o mais recalcitrante, extraído pelo NaOH. Além disso, as fontes de Po não afetaram os valores de Po extraído pelo NaOH  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , tanto no tratamento P-glicerolfosfato, quanto no P-fítico. A ausência de efeito do tratamento P-glicerolfosfato pode ser devido à possível taxa de mineralização, evidenciada pelo maior rendimento de massa seca (Tabela 1) e sua disponibilidade, principalmente avaliada nas frações PiRTA, PiBIC e PiOH-I (Tabelas 3 e 4). A aplicação de P-fítico também não foi detectada nessa fração. Isso deve-se

provavelmente à forte interação do P fítico com os minerais solo, entre eles os óxidos de Fe (DE GROOT; GOLTERMAN, 1993), dificultando sua extração do solo. A extração com extratores alcalinos e ácidos não consegue retirar o P fítico do solo (BOWMAN; COLE, 1978), mostrando que somente o NaOH sozinho não é eficiente na extração dessa fonte. Por isso, a adição de complexantes como o EDTA aumentaria a recuperação de P (BOWMAN; MOIR, 1993). O ácido fítico é altamente adsorvido ao solo, apresentando uma forte relação com os minerais do solo, como os óxidos de Fe (DE GROOT; GOLTERMAN, 1993).

Os teores de PoOH-II foram maiores nos teores iniciais “médio” e “alto” (Tabela 7). Já os teores iniciais “baixo” foram superiores ao “muito baixo”. Com os resultados demonstra-se que pode ter ocorrido uma mineralização do Po em valores de de P “muito baixo” e “baixo” ou ocorrido uma adsorção de parte desse P em sítios mais ávidos. No entanto, essa mineralização de Po não é suficiente para acarretar em aumento de produção pelas plantas, pois os níveis de P disponível são muito baixos. Assim, esse P mineralizado, já é adsorvido aos coloides do solo com alta energia de adsorção. Provavelmente, para uma maior utilização dessas fontes orgânicas é preciso que o nível de disponibilidade de P não seja muito baixo e a planta não seja muito exigente em P.

Avaliando somente as fontes de P, os tratamentos com aplicação de P foram superiores em relação aos valores de PoOH-II em relação à testemunha, independente da fonte utilizada (Tabela 7). Isso pode ser devido à maior disponibilidade de P do solo com a aplicação de P e a ativação dos microrganismos, aumentando a biomassa microbiana. Esse extrator extrai Po do solo adsorvido com média-alta energia de adsorção ao solo, provavelmente presente nos microagregados, que podem ser acessados pelos microrganismos do solo.

Tabela 7 - Fósforo orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoBIC),  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoOH-I) e  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoOH-II) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média   |
|---------|------------|----------|------------|-----------|---------|
| PoBIC   |            |          |            |           |         |
| M baixo | 3,08 aB    | 3,17 aB  | 5,54 aA    | 5,60 aA   | 3,45 b  |
| Baixo   | 5,13 aA    | 5,26 aA  | 4,26 bA    | 3,95 bA   | 4,64 b  |
| Médio   | 3,81 aB    | 5,54 aA  | 6,57 aA    | 6,36 aA   | 5,57 a  |
| Alto    | 4,39 aA    | 4,29 aA  | 2,84 bA    | 2,24 bA   | 3,44 c  |
| Média   | 4,10 A     | 4,57 A   | 4,80 A     | 4,54 A    |         |
| PoOH-I  |            |          |            |           |         |
| M baixo | 32,36      | 31,82    | 31,77      | 29,22     | 31,29   |
| Baixo   | 28,52      | 30,17    | 29,27      | 25,14     | 28,28   |
| Médio   | 29,10      | 32,45    | 23,96      | 19,97     | 26,37   |
| Alto    | 27,51      | 25,30    | 26,92      | 32,07     | 27,95   |
| Média   | 29,37      | 29,93    | 27,98      | 26,60     |         |
| PoOH-II |            |          |            |           |         |
| M baixo | 9,34       | 14,39    | 11,74      | 13,88     | 12,38 c |
| Baixo   | 14,18      | 15,80    | 18,59      | 20,68     | 17,31 b |
| Médio   | 16,23      | 21,51    | 22,79      | 25,33     | 22,22 a |
| Alto    | 23,60      | 23,86    | 20,08      | 22,67     | 22,55 a |
| Média   | 15,84 B    | 18,89 A  | 19,05 A    | 20,64 A   |         |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico=P fítico; P-solúvel= P solúvel ( $(\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2)$ ; M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

### 6.3.2 Frações de P após o cultivo sucessivo com trigo

Os teores de PiBIC apresentaram interação entre as fontes e os teores iniciais de P disponível no solo após o cultivo de trigo (Tabela 8). A RTA é um extrator que apresenta correlação com o rendimento de plantas (SCHOENAU; HUANG, 1991) e utilizado como método padrão para análise de rotina em determinados locais. De maneira geral, os maiores valores de PiRTA foram encontrados nos teores de P disponível “médio” e “alto” e na fonte solúvel (Tabela 8), semelhante aos valores do primeiro cultivo, apenas diminuindo o grau de magnitude em relação ao primeiro cultivo.

Na testemunha e no P-fítico, os maiores valores de PiRTA foram verificados no teor “alto”. Já para o tratamento P-glicerolfosfato, o maior valor foi no teor inicial “médio” e para o P-solúvel, os maiores valores foram nos teores de P disponível “médio” e “alto”.

Em relação às fontes adicionadas, os maiores valores foram encontrados no P-solúvel em todos os níveis de disponibilidade do solo, sendo que no teor “baixo” e “médio” os valores foram semelhantes aos do P-glicerolfosfato. Já o P-fítico apresentou valores semelhantes à testemunha em todos os teores de disponibilidade de P no solo. Esses resultados evidenciam os menores resultados de massa seca obtidos no cultivo de milho e de trigo, visto que o tratamento P-fítico apresentou menores valores de massa seca e semelhantes à testemunha (Tabelas 2 e 3). Além disso, os valores de PiRTA da testemunha e P-fítico são considerados teores muito baixo de P ( $< 5,00 \text{ mg kg}^{-1}$ ) (CQFS-RS/SC, 2004), mostrando que a quantidade de P disponível nesses tratamentos são abaixo do adequado para o crescimento das plantas.

Os teores de PiBIC não apresentaram interação entre níveis de P disponível e fontes de P (Tabela 8). Os resultados do

PiBIC foram maiores no teores iniciais “alto”, seguido do teor “médio”. Os resultados foram semelhantes ao primeiro cultivo com milho, no entanto, houve uma redução de 18% na disponibilidade de PiBIC do primeiro para o segundo cultivo, indicando que com o cultivo das plantas essa forma de P foi acessada. Essa diminuição é devido a vários fatores, como absorção de P pelas culturas (KAMPRATH, 1999), e reordenação do P em formas menos lábeis (WALKER; SYERS, 1976). Essas modificações são mais visíveis em solos com alto poder tampão e com baixa disponibilidade (KAMPRATH, 1999).

Os maiores valores de PiBIC foram observados no tratamento P-solúvel e P-glicerolfosfato, seguido do P-fítico e testemunha, que foram semelhantes (Tabela 8). A maior disponibilidade de PiBIC e PiRTA no tratamento P-solúvel reforçam os maiores valores de rendimento de massa seca de trigo, visto que são formas lábeis de P e que contribuem efetivamente com a solução do solo e absorção pelas plantas (MCLAREN et al., 2013).

Tabela 8 - Fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiBIC) após o cultivo do milho e de trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média   |
|---------|------------|----------|------------|-----------|---------|
| PiRTA   |            |          |            |           |         |
| M baixo | 1,49 cC    | 1,94 cC  | 4,50 cB    | 6,91 bA   | 3,71 b  |
| Baixo   | 3,32 bB    | 3,15 cB  | 6,01 cA    | 5,92 bA   | 4,60 b  |
| Médio   | 4,78 bB    | 5,57 bB  | 11,8 aA    | 12,8 aA   | 8,72 a  |
| Alto    | 7,52 aB    | 7,96 aB  | 8,84 bB    | 11,4 aA   | 8,91 a  |
| Média   | 4,28 C     | 4,65 C   | 7,78 B     | 9,24 A    |         |
| PiBIC   |            |          |            |           |         |
| M baixo | 4,73       | 4,73     | 5,84       | 6,28      | 5,51 c  |
| Baixo   | 5,19       | 5,95     | 7,27       | 6,61      | 6,14 c  |
| Médio   | 6,61       | 7,93     | 8,70       | 8,81      | 8,01 b  |
| Alto    | 11,45      | 11,12    | 12,88      | 14,42     | 12,47 a |
| Média   | 7,00 B     | 7,43 B   | 8,67 A     | 9,03 A    |         |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico=P fítico; P-solúvel= P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os valores de PiOH-I apresentaram interação entre teor inicial de P disponível e fonte de P (Tabela 9). Os maiores valores de PiOH-I foram observados no teor “alto” para todos os tratamentos. Já em relação às fontes, os maiores valores foram

observados no P-glicerolfosfato e P-solúvel para o teor “médio” e somente no P-solúvel no teor “alto”. Esses maiores valores de  $PiOH-I$  no teor “alto”, assim como no P-solúvel ou P-glicerolfosfato se devem, provavelmente, à maior disponibilidade, provocando um pequeno acúmulo nessa fração.

Os teores de  $PiOH-II$  foram maiores nos teores “médio” e “alto” (Tabela 9), sendo afetados pelas fontes de P. Esses dados são semelhantes aos dados após o primeiro cultivo de milho. No entanto, com o segundo cultivo houve uma diminuição dos valores médios, devido principalmente à adsorção específica em formas menos lábeis (LINGUIST et al., 1996) ou pela absorção pelas plantas. Além disso, após o revolvimento do solo para a coleta de raízes no primeiro cultivo e a secagem do solo com posterior cultivo, pode ter ocorrido uma redistribuição do P. Esse mecanismo de secagem do solo pode afetar a disponibilidade de  $P_o$  e  $P_i$ , mas é de pouco entendido, sendo provavelmente relacionado a aspectos físicos e químicos (TURNER; HAYGARTH, 2003).

Tabela 9 - Fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-I) e 0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-II) após o cultivo do milho e de trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média   |
|---------|------------|----------|------------|-----------|---------|
| PiOH-I  |            |          |            |           |         |
| M baixo | 26,64 cA   | 26,17 bA | 26,39 cA   | 28,01 cA  | 26,80 c |
| Baixo   | 24,67 cA   | 27,66 bA | 29,74 cA   | 26,74 cA  | 27,20 c |
| Médio   | 31,58 bB   | 31,47 bB | 42,54 bA   | 43,34 bA  | 37,23 b |
| Alto    | 48,53 aC   | 48,18 aC | 57,06 aB   | 63,17 aA  | 54,23 a |
| Média   | 32,86 B    | 33,37 B  | 38,93 A    | 40,32 A   |         |
| PiOH-II |            |          |            |           |         |
| M baixo | 11,23      | 10,87    | 10,03      | 10,63     | 10,69 c |
| Baixo   | 10,63      | 11,48    | 14,25      | 14,50     | 12,71 b |
| Médio   | 14,26      | 15,22    | 13,77      | 15,58     | 14,71 a |
| Alto    | 15,58      | 15,82    | 11,92      | 15,94     | 14,83 a |
| Média   | 12,96      | 13,55    | 12,50      | 14,16     |         |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P-glicerolfosfato; P-fítico=P-fítico; P-solúvel= P-solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os valores de PiHCl foram influenciados pelos teores de P disponível e pelas fontes de P no solo após o cultivo de trigo (Tabela 10). O maior valor foi encontrado no teor “alto”. O teor “médio” foi superior ao “muito baixo” e “baixo”, sendo esses



dois últimos semelhantes. Os valores de  $PiHCl$  do segundo cultivo foram 57% superiores aos do primeiro cultivo, entretanto, esses teores variaram entre 3 e 6  $mg\ kg^{-1}$ . Parte desse  $Pi$  pode ser devido à maior mineralização do  $Po$ , principalmente do  $P$  adsorvido com alta energia de adsorção aos ácidos húmicos e fúlvicos, que foram mineralizados pelos cultivos.

Diferente do primeiro cultivo, no segundo cultivo as fontes de  $P$  influenciaram os teores de  $PiHCl$ , sendo que os maiores teores foram encontrados nos tratamentos com aplicação de  $P$  (Tabela 10). Após o primeiro cultivo, o solo foi totalmente revolvido, secado e cultivado. Esse processo provavelmente expôs novos sítios de adsorção e pode ter ocorrido redistribuição de parte do  $P$  em diversos compartimentos, tendendo a maior estabilidade.

O teor de  $PRES$  não apresentou diferença entre os teores de  $P$  disponível e as fontes de  $P$  adicionado, sendo que a média de todas as fontes e os tratamentos foi de 128,07  $mg\ kg^{-1}$  para todos os tratamentos. Esses valores são semelhantes aos valores do primeiro cultivo (média de 135  $mg\ kg^{-1}$ ), no entanto, após o segundo cultivo não houve diferença entre as fontes, como apresentado no primeiro cultivo.

Tabela 10 - Fósforo inorgânico extraído por HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (PiHCl) e P residual extraído com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (PRES) após o cultivo do milho e de trigo nos teores iniciais P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em mg kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol<br>PiHCl | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|--------|
| M baixo | 2,76       | 3,71     | 3,42                | 3,67      | 3,39 c |
| Baixo   | 3,17       | 3,77     | 3,30                | 3,17      | 3,39 c |
| Médio   | 3,75       | 4,50     | 5,04                | 5,15      | 4,61 b |
| Alto    | 5,49       | 5,12     | 5,39                | 5,00      | 5,25 a |
| Média   | 3,79 B     | 4,28 A   | 4,29 A              | 4,25 A    |        |
| PRES    |            |          |                     |           |        |
| M baixo | 129,54     | 131,41   | 122,80              | 128,02    | 127,94 |
| Baixo   | 126,45     | 133,85   | 111,80              | 120,86    | 123,24 |
| Médio   | 134,29     | 121,77   | 126,94              | 120,08    | 125,77 |
| Alto    | 125,29     | 133,10   | 124,39              | 158,61    | 135,34 |
| Média   | 128,89     | 130,03   | 121,48              | 131,89    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P-glicerolfosfato; P-fítico=P-fítico; P-solúvel= P-solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os teores de PoBIC não apresentaram interação entre teores iniciais de P disponível e fontes de P, apresentando somente efeitos simples (Tabela 11). Diferente dos demais

extratores, o PoBIC foi menor no teor de P “alto” em relação aos demais. Já os outros teores não apresentaram diferenças entre si.

A menor disponibilidade de P no teor “alto” pode ter influenciado no processo de mineralização do Po, indicando enquanto o solo estava incubado, e continuado ao longo do cultivo, visto que após o primeiro cultivo, o teor de P disponível alto já teve os menores valores de PoBIC na média dos tratamentos (Tabela 7). Isso pode ser devido ao efeito “priming” principalmente pela maior taxa de mineralização onde há maior disponibilidade de nutrientes. O  $\text{NaHCO}_3$  extrai compostos solúveis, incluindo fosfatos, fosfolipídios, DNA e fosfatos monoésteres simples, que são biologicamente disponíveis (TURNER; LEYTEM, 2004), no qual a maior disponibilidade pode ter promovido a atuação biológica dos microrganismos do solo.

Em relação às fontes de P, o PoBIC foi maior no P-solúvel e P-fítico (Tabela 11). Esse maior valor de PoBIC no P-solúvel pode ser devido ao maior incremento na disponibilidade de P com a mistura de solo e o incremento na biomassa microbiana do solo, já que ocorre um incentivo na população microbiana com o aumento na disponibilidade do solo (BÜNEMANN, 2015). Já o P-glicerolfosfato teve uma tendência de diminuição do primeiro para o segundo cultivo. Isso se deve, provavelmente, pela taxa de mineralização do P-glicerolfosfato e pelo aumento da biomassa microbiana no primeiro cultivo e, provavelmente, a sua morte pelo não acúmulo de material vegetal no solo.

O valor de PoOH-I não apresentou interação entre o P disponível e as fontes de P, tendo diferença apenas para as fontes de P (Tabela 11). Os maiores valores de PoOH-I foram encontrados no tratamento P-fítico. Isso mostra que parte do Po adicionado no P-fítico e não mineralizada foi detectado com o extrator  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , mas sendo pouco mineralizado, pois foi detectado na fração orgânica. No entanto, ocorreu

mineralização líquida de Po do primeiro para o segundo cultivo para todos os níveis e fontes, sendo que a média de PoOH-I do primeiro cultivo foi de 28,47 mg kg<sup>-1</sup> e de 21,95 mg kg<sup>-1</sup> no segundo cultivo. Essa mineralização pode ser devido ao revolvimento do solo, que expôs o P aos microrganismos e assim potencializou o processo de mineralização. Assim, há um relacionamento no controle da disponibilidade de P pela mineralização, no qual as frações estáveis de Po como o PoOH-I atuam como fonte primária e como uma fração transicional para outras frações de Po (GAMA-RODRIGUES et al., 2014). Contudo, isso não garante que parte desse P seja disponibilizado para as plantas, visto que o P-fítico apresentou baixo desempenho na produção de biomassa (Tabela 3). Assim, parte desse P mineralizado pode ter sido adsorvido em outros compartimentos, com semelhante ou maior energia de adsorção.

Os valores de PoOH-II não foram afetados pelos níveis de P e nem pelas adições de P após o cultivo de milho e de trigo, sendo que a média foi de 9,46 mg kg<sup>-1</sup> de P. Já no primeiro cultivo, os teores de PoOH-II foram praticamente o dobro, com cerca de 18,60 mg kg<sup>-1</sup> de P para todos os tratamentos. Esses resultados permitem demonstrar uma maior mineralização de Po do solo após os cultivos, o que já era esperado. No entanto, essa mineralização parece contribuir pouco para as plantas anuais cultivadas nesse estudo, visto que as fontes com teores mais baixos de P apresentaram sintomas de deficiência de P tanto para o primeiro cultivo como para o segundo cultivo. Cabe ressaltar que os demais teores de nutrientes na folha foram suficientes para o crescimento das plantas (Apêndices B-E).

Tabela 11 - Fósforo orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoBIC),  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoOH-I) e  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoOH-II) após o cultivo do milho e do trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Resultados em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| PoBIC   |            |          |            |           |        |
| M baixo | 5,57       | 4,92     | 3,82       | 5,32      | 4,91 a |
| Baixo   | 3,53       | 5,38     | 4,92       | 4,47      | 4,57 a |
| Médio   | 3,82       | 5,77     | 5,12       | 6,62      | 5,33 a |
| Alto    | 2,24       | 3,34     | 1,91       | 5,31      | 3,20 b |
| Média   | 3,79 B     | 4,85 A   | 3,94 A     | 5,43 A    |        |
| PoOH-I  |            |          |            |           |        |
| M baixo | 20,87      | 24,54    | 13,15      | 18,60     | 19,29  |
| Baixo   | 12,94      | 29,85    | 27,06      | 21,35     | 22,80  |
| Médio   | 24,43      | 29,15    | 24,25      | 19,46     | 24,32  |
| Alto    | 25,55      | 23,11    | 19,22      | 17,64     | 21,38  |
| Média   | 20,95 B    | 26,66 A  | 20,92 B    | 19,26 A   |        |
| PoOH-II |            |          |            |           |        |
| M baixo | 10,70      | 7,27     | 5,41       | 9,74      | 8,28   |
| Baixo   | 10,22      | 7,75     | 7,94       | 6,35      | 8,07   |
| Médio   | 9,30       | 7,79     | 11,67      | 9,86      | 9,66   |
| Alto    | 12,03      | 9,90     | 13,21      | 12,21     | 11,84  |
| Média   | 10,56      | 8,17     | 9,56       | 9,54      |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P-glicerolfosfato; P-fítico=P-fítico; P-solúvel= P-solúvel ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os resultados permitem verificar que o P-fítico apresentou pouca participação no desempenho das plantas de milho e trigo, sendo que essa fonte quando detectada no fracionamento químico de P foi apenas encontrada na PRES do primeiro cultivo e no PoOH-I do segundo cultivo. Pela análise de fracionamento, verifica-se que grande parte do P-fítico extraída estava presente na fração orgânica, ou seja, não foi mineralizada e, por isso, possui baixo potencial de contribuição para as plantas anuais como o milho e o trigo, possivelmente pelo baixo tempo de cultivo.

#### 6.4 UTILIZAÇÃO DE FÓSFORO ORGÂNICO POR PLANTAS EM UM NITOSSOLO BRUNO

##### 6.4.1 Rendimento e frações de fósforo no solo

Os maiores valores de massa seca de milho no Nitossolo Bruno foram encontrados nos teores iniciais “médio” e “alto”, seguido do teor “muito baixo” e “baixo” (Tabela 12). A massa seca das plantas de milho variou de 1,28 a 1,65 g, sendo inferior aos valores observados no Argissolo Vermelho amarelo distrófico. Isso se deve, aos teores “muito baixo” e “baixo”, provavelmente, ao alto poder tampão do Nitossolo Bruno, que tem valores de P disponível nativo muito baixo, mas com alta capacidade de adsorção do solo, possivelmente pela sua mineralogia. Além disso, a velocidade de transformação de P disponível em formas menos disponível é mais rápido em solo altamente tamponado. Assim, em poucas horas ou até minutos, grande parte do P adicionado pode ser adsorvido em formas mais recalcitrantes (GATIBONI, 2003).

Os valores de massa seca de milho em função das fontes foram maiores no P-glicerolfosfato (Tabela 12). Os valores de

massa seca do tratamento P-solúvel foram semelhantes aos teores do P-fítico, mas superiores à testemunha. Esses maiores valores de massa seca de raiz e de parte aérea de milho no P-glicerolfosfato reforçam a ideia de que parte do P foi sendo mineralizada com o tempo. A fonte solúvel mostrou um baixo desempenho, mas diferentemente do usado no solo anterior, aqui foi utilizado como fonte de P o  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , que é completamente solúvel. Assim, provavelmente o menor desempenho do tratamento P-solúvel em relação ao P-glicerolfosfato foi devido à alta adsorção do P solubilizado imediatamente no solo logo após a semeadura. Cabe ressaltar que as fontes de P foram adicionados logo após a semeadura de milho, sendo que o P começou a ser mineralizado e/ou adsorvido cerca de uma semana antes do início da absorção pelas plantas. Isso pode ter influenciado no processo de adsorção, já que com o tempo é esperado maior adsorção e, conseqüentemente, menor disponibilidade (WANG et al., 2000; BÜNEMAN et al., 2004).

Os valores de P no tecido de milho apresentaram interação entre os teores de P e as fontes de P (Tabela 12). Os maiores valores de P foram observados nos teores “médio” e “alto” na testemunha e somente no teor “médio” para o P-fítico e P-solúvel. Para o P-glicerolfosfato, os maiores valores de P no tecido foram observados nos teores de P disponível “baixo” e “alto”. O P-glicerolfosfato apresentou os maiores valores de P no tecido nos teores “muito baixo”, “baixo” e “alto”, sendo que no teor médio os maiores valores foram encontrados nos tratamentos com adição de P. Esses maiores valores de P no tecido de milho (raiz e parte aérea) no tratamento P-glicerolfosfato são devidos à sua maior disponibilidade e consequente absorção.

O valor de P absorvido pelo milho foi maior nos teores iniciais “médio” e “alto” (Tabela 12). Os teores de P disponível “muito baixo” e “baixo” foram semelhantes mas inferiores aos demais tratamentos. Esses maiores valores de P absorvido no

tecido refletem a maior disponibilidade de P nos níveis mais elevados e, consequentemente, sua maior absorção. Além disso, a maior absorção de P está relacionada diretamente com maior produção de biomassa e maior valor de P no tecido os dados de massa seca e teor no tecido.

Os maiores valores de P absorvido no milho ocorreram no P-glicerolfosfato, seguindo os mesmos resultados do primeiro cultivo do estudo 1. Os valores de P absorvidos nos tratamentos P-solúvel e P-fítico foram semelhantes, mas superiores à testemunha. Mas os valores de P absorvido foram apenas cerca de 22% dos valores encontrados no primeiro cultivo de milho com o Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Esses menores valores observados nesse tratamento ajudam a entender o menor resultado da fonte solúvel, visto que o processo de adsorção foi predominante no solo, e o solo apresenta alto teor de argila, aliado a teores baixos de P.



Tabela 12 - Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo no tecido de milho nos teores de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Nitossolo Bruno após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,73       | 0,92     | 2,31       | 1,34      | 1,33 b |
| Baixo                                      | 0,93       | 0,98     | 2,00       | 1,19      | 1,28 b |
| Médio                                      | 1,26       | 1,61     | 2,21       | 1,49      | 1,65 a |
| Alto                                       | 1,17       | 1,29     | 2,34       | 1,52      | 1,57 a |
| Média                                      | 1,02 C     | 1,20 B   | 2,22 A     | 1,38 B    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,54 cB    | 0,58 cB  | 1,05 bA    | 0,66 bB   | 0,71 c |
| Baixo                                      | 0,74 bB    | 0,88 bB  | 1,34 aA    | 0,79 bB   | 0,94 b |
| Médio                                      | 0,94 aB    | 1,12 aA  | 1,13 bA    | 1,15 aA   | 1,08 a |
| Alto                                       | 1,00 aB    | 0,86 bB  | 1,22 aA    | 0,86 bB   | 0,98 b |
| Média                                      | 0,79 B     | 0,86 B   | 1,19 A     | 0,86 B    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,39       | 0,59     | 2,64       | 0,82      | 1,11 b |
| Baixo                                      | 0,76       | 0,87     | 2,65       | 0,95      | 1,31 b |
| Médio                                      | 1,01       | 1,80     | 2,50       | 1,59      | 1,72 a |
| Alto                                       | 1,09       | 1,10     | 2,85       | 1,23      | 1,57 a |
| Média                                      | 0,82 C     | 1,09 B   | 2,66 A     | 1,15 B    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

### 6.4.2 Frações de P no solo Nitossolo Bruno

Os teores de PiRTA no Nitossolo Bruno não apresentaram interação entre os níveis de P e as fontes, apresentando apenas efeitos simples (Tabela 13). Os valores de PiRTA seguiram a tendência de maior quantidade quanto maior o teor de P, com valores de 13, 17, 19, 28 mg kg<sup>-1</sup> de P, respectivamente, para os teores iniciais “muito baixo”, “baixo”, “médio” e “alto”. Parte desses valores de cada nível contradizem os valores encontrados no manual de adubação e calagem do Estado de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (CQFS-SC/RS, 2004), no qual mostram que valores de PiRTA dos teores “muito baixo” e “baixo” são abaixo de 5 e entre 5-10 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, neste estudo, mesmo as plantas apresentando teores adequados ou acima do recomendado pela CQFS-RS/SC (2004), elas apresentaram sintomas visuais de deficiência de P em todos os níveis de P. Isso mostra que a RTA é sensível ao teor de argila do solo, visto que no solo arenoso os teores da RTA foram inferiores.

O valor de PiRTA foi maior no P-glicerolfosfato seguido do P-solúvel e P-fítico (Tabela 13). O teor de PiRTA do P-solúvel foi semelhante ao P-fítico, sendo esses superiores à testemunha. Esse comportamento da maior disponibilidade de P no P-glicerolfosfato é condizente com os resultados de P da massa seca do tecido e valor de P absorvido (Tabela 12) e também dos valores de massa seca do primeiro cultivo do estudo 1, mas em solo arenoso (Tabela 2). Já o P-solúvel foi semelhante ao P-fítico, uma vez que pode ter prevalecido as reações de adsorção da fonte solúvel. Essas reações de adsorção podem ter sido potencializadas devido às características do solo, mas também ambientais, como temperatura elevada e alta umidade do solo durante o cultivo.

Semelhante aos teores de PiRTA, os teores de PiBIC seguiram a tendência de maior disponibilidade no solo no teor

“alto” (Tabela 13). Essa fração mostra grande correlação com a absorção de P pelas plantas, sendo utilizado mais em solos calcários devido à diminuição da atividade do Ca na solução (BAIR; DAVENPORT, 2013; MCLAREN et al., 2013). No entanto, ele também pode ser utilizado em solos com pH baixo, precisando somente de uma calibração de campo. O extrator  $\text{NaHCO}_3$  é amplamente utilizado em solos calcários (MCLAREN et al., 2013), também chamado de extrator Olsen, apresentando a mesma concentração de  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  e tempo de agitação de 30 minutos com a mesma relação solo:solução de 1:20.

Os valores de PiBIC foram menores na testemunha (Tabela 13). Assim, o PiBIC não detectou a diferença entre as fontes com aplicação de P após o cultivo, mesmo com a contribuição significativa do P-glicerolfosfato na produção de biomassa do solo. Em alguns casos, a extração com  $\text{NaHCO}_3$  pode não apresentar acurácia com a quantidade de P absorvido (RECENA et al., 2015). Para este estudo, isso pode ser devido ao alto poder tampão do solo e às aplicações de  $27 \text{ mg kg}^{-1}$  de P serem muito pequenas para apresentar diferença, principalmente em solos altamente tamponados.

Tabela 13 - Fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PiBIC) após o cultivo do milho nos teores de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitosso Bruno. Resultados em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol<br>PiRTA | P-solúvel | Média   |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|---------|
| M baixo | 10,16      | 12,22    | 15,78               | 12,79     | 12,74 c |
| Baixo   | 15,79      | 17,87    | 18,22               | 17,44     | 17,33 b |
| Médio   | 17,73      | 17,32    | 23,58               | 18,40     | 19,27 b |
| Alto    | 22,98      | 29,04    | 34,18               | 26,08     | 28,07 a |
| Média   | 16,67C     | 19,11 B  | 22,94 A             | 18,68 B   |         |
| PiBIC   |            |          |                     |           |         |
| M baixo | 2,71       | 3,11     | 2,44                | 3,11      | 2,85 d  |
| Baixo   | 3,38       | 4,17     | 5,82                | 5,28      | 4,74 c  |
| Médio   | 6,36       | 6,77     | 7,72                | 7,32      | 7,04 b  |
| Alto    | 10,70      | 11,78    | 12,05               | 11,79     | 11,58   |
| Média   | 5,79 B     | 6,46 A   | 7,01 A              | 6,87 A    |         |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os valores de PiOH-I foram diferentes para todos os teores de P disponível no solo (Tabela 14), sendo que os valores variaram de 43 a 102  $\text{mg kg}^{-1}$  para o teor inicial “muito baixo” até o teor “alto”. Esses resultados evidenciam o grande poder sortivo desse solo, já que somente na fração extraída com NaOH 0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  foi preciso aplicar cerca de 60  $\text{mg kg}^{-1}$  de P para

e elevar o solo até o teor de P adequado (alto). Estes resultados evidenciam a baixa resposta à aplicação com P solúvel, já que foi aplicado uma dose de apenas 27 mg kg<sup>-1</sup> de P de solo, que foi adsorvido nos diversos compartimentos do solo.

Em relação às fontes de P, os maiores valores de PiOH-I foram encontrados nos tratamentos P-glicerolfosfato e P-solúvel (Tabela 14). Já a testemunha e o P-fítico foram semelhantes. Isso mostra que, semelhante ao solo arenoso, no Nitossolo Bruno, provavelmente, o P-fítico não foi mineralizado, ficando adsorvido fortemente o solo.

Os valores de PiOH-II apresentaram interação entre os teores iniciais de P disponível e as fontes (Tabela 14). Os maiores valores de PiOH-II ocorreram no teor “alto” nos tratamentos P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel. A testemunha apresentou os maiores valores nos teores “baixo”, “médio” e “alto”. Avaliando apenas as fontes dentro de cada nível, no teor inicial “baixo” os maiores teores foram nos tratamentos testemunha e P-solúvel. Para o teor “médio”, os maiores valores foram observados no P-glicerolfosfato e no P-solúvel. Já no teor “alto” os maiores valores foram observados nos tratamentos com as fontes de P. Esses maiores valores de P em tratamentos com aplicação de P significam que mesmo em pequena taxa de adição de P, ocorre uma maior quantidade de P nas frações extraídas com NaOH, visto que esse é um estoque importante de P em solos argilosos com presença marcante de argilominerais silicatados. Isso era esperado, já que em cultivos com aplicação de P acima da capacidade de extração, ocorre acúmulo de P em todas as frações (WANG et al., 2007).

Tabela 14 - Fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (NaOH-I) e por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (NaOH-II) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno. Resultados em mg kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média    |
|---------|------------|----------|------------|-----------|----------|
| PiOH-I  |            |          |            |           |          |
| M baixo | 37,90      | 42,93    | 47,26      | 44,04     | 43,03 d  |
| Baixo   | 57,16      | 61,20    | 67,21      | 63,29     | 62,22 c  |
| Médio   | 74,57      | 74,57    | 83,77      | 76,29     | 77,30 b  |
| Alto    | 91,87      | 101,31   | 107,57     | 107,08    | 101,96 a |
| Média   | 65,38 B    | 70,00 B  | 72,67 A    | 76,45 A   |          |
| PiOH-II |            |          |            |           |          |
| M baixo | 35,73 bA   | 31,66 cA | 33,88 cA   | 29,20 dA  | 32,61d   |
| Baixo   | 41,76 aA   | 36,71 bB | 43,24 bB   | 37,30 cA  | 39,85 c  |
| Médio   | 39,42 aB   | 40,41 bB | 45,83 bA   | 44,60 bA  | 42,56 b  |
| Alto    | 42,87 aB   | 52,23 aA | 57,16 aA   | 54,33 aA  | 51,64 a  |
| Média   | 39,94 B    | 40,25 B  | 45,03 A    | 41,45 B   |          |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os valores de PiHCl foram afetados apenas pelo teor inicial de P disponível do solo, sendo o maior valor no “alto” (Tabela 15). Esse extrator retira o P que é altamente recalcitrante em solos intemperizados, contribuindo muito pouco para a

nutrição das plantas (GATIBONI et al., 2007). Além disso, geralmente os valores elevados nessa fração estão associados a altos teores de Ca (TURNER; LEYTEM, 2004), com pH elevado acompanhado a teores elevados de P (BORDA et al., 2014), o que leva à neoformação de fosfatos de cálcio (ERIKSSON et al., 2015), principalmente em solos calcários. Aumento nos teores de  $\text{PiHCl}$  em solos com aplicação de calcário e fertilizantes fosfatados também são encontrados em solos intemperizados, associados à elevada adição de fertilizantes e adição de calcário no solo (SCHMITT et al., 2013). No entanto, verifica-se com estes valores que as adições de P para a construção dos teores de disponibilidade de P e a adição de Ca através da adição do calcário afetaram muito pouco a fração  $\text{PiHCl}$ , possivelmente pela baixa taxa de adição de P.

Os valores de PRES não foram influenciados pelas doses nem pelas fontes, sendo o que o teor médio de P foi  $767,60 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$  (Tabela 15). Essa fração é responsável pelo Pi presente fortemente adsorvido aos minerais e ao Po altamente recalcitrante no material orgânico que os extratores anteriores não conseguiram retirar. Assim, esse solo apresentou alto poder sortivo e a maior parte do P está presente nessa fração, contribuindo muito pouco para o rendimento das plantas. Por isso, para um adequado desenvolvimento das plantas nesse solo, é necessário utilizar doses elevadas de P, para que grande parte do P seja adsorvido aos diversos compartimentos, principalmente os menos lábeis, até que com o equilíbrio químico, parte desse P fique disponível. Por isso, a pouca contribuição da fonte solúvel, pode ser devido a adsorção de parte desse P nos diversos compartimentos, principalmente devido à baixa aplicação de P ( $27 \text{ mg kg}^{-1} \text{ de P}$ ), mesmo no teor alto.

Tabela 15 - Fósforo inorgânico extraído por HCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> (PiHCl) e por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (PRES) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno. Resultados em mg kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P fítico | P glicerol<br>PiHCl | P solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|--------|
| M baixo | 1,26       | 1,08     | 1,02                | 1,20      | 1,14 b |
| Baixo   | 1,67       | 1,67     | 1,88                | 1,83      | 1,76 a |
| Médio   | 1,44       | 1,35     | 1,29                | 1,33      | 1,35 b |
| Alto    | 0,87       | 1,24     | 1,09                | 0,79      | 1,00 b |
| Média   | 1,31       | 1,33     | 1,32                | 1,29      |        |
| PRES    |            |          |                     |           |        |
| M baixo | 746,48     | 813,57   | 867,73              | 669,94    | 774,43 |
| Baixo   | 789,17     | 647,89   | 738,87              | 771,19    | 736,78 |
| Médio   | 775,68     | 741,44   | 683,00              | 774,62    | 743,68 |
| Alto    | 786,24     | 813,57   | 773,76              | 888,49    | 815,52 |
| Média   | 774,39     | 754,12   | 765,84              | 776,06    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os valores de PoBIC não foram influenciados nem pelos teores iniciais nem pelas fontes de P, apresentado média geral de 12,43 mg kg<sup>-1</sup>. Isso mostra que tanto os teores iniciais como as fontes de P não apresentaram efeitos na mineralização do PoBIC.



Essa ausência de efeito pode ser devido aos valores baixos de Po dessa fração.

Os valores de PoOH-I foram influenciados apenas pelas fontes de P (Tabela 16). Os maiores valores de PoOH-I foram observados no P-fítico. Pressupõe-se que o extrator NaOH extrai parte dos compostos orgânicos pouco solúveis, incluindo P-fítico, com baixa disponibilidade para os microrganismos do solo (TURNER; LEYTEM, 2004). Esses maiores valores de PoOH-I no tratamento P-fítico são reflexo da baixa taxa de mineralização ocorrida ao longo do cultivo e sua adsorção ao solo, semelhante ao segundo cultivo do primeiro estudo, com solo arenoso, mostrando que essa fonte ficou adsorvida principalmente aos colóides do solo. Já o tratamento P-glicerolfosfato foi semelhante ao P-solúvel, mostrando que provavelmente foi mineralizado.

Os valores de PoOH-II não foram influenciados pelos teores iniciais de P disponível e nem pelas fontes, sendo que a média geral foi de  $65,80 \text{ mg kg}^{-1}$  de P (Tabela 16). Atribui-se que o NaOH  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  extrai o P orgânico e inorgânico química e fisicamente protegidos nas superfícies internas dos microagregados (CROSS; SCHLESSINGER, 1995). Essa ausência de efeito pode ser devido à maior agregação do solo argiloso e ao pequeno tempo de reação do P com o solo, visto que provavelmente é necessário maior tempo de contato para modificações nessa fração.

Tabela 16 - Fósforo orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoBIC),  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoOH-I) e por  $\text{NaOH}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (PoOH-II) após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno. Resultados em  $\text{mg kg}^{-1}$ .

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| PoBIC   |            |          |            |           |        |
| M baixo | 11,12      | 12,05    | 11,83      | 11,58     | 11,65  |
| Baixo   | 14,63      | 11,32    | 12,62      | 10,07     | 12,16  |
| Médio   | 11,89      | 12,54    | 13,48      | 12,45     | 12,59  |
| Alto    | 13,78      | 11,45    | 14,95      | 13,09     | 13,32  |
| Média   | 12,85      | 11,84    | 13,22      | 11,80     |        |
| PoOH-I  |            |          |            |           |        |
| M baixo | 84,62      | 117,95   | 83,35      | 104,42    | 97,58  |
| Baixo   | 118,62     | 105,94   | 95,87      | 86,55     | 101,69 |
| Médio   | 98,44      | 132,93   | 100,00     | 108,31    | 109,92 |
| Alto    | 101,29     | 121,37   | 105,18     | 107,33    | 108,79 |
| Média   | 100,74 B   | 119,49 A | 96,10 B    | 101,65 B  |        |
| PoOH-II |            |          |            |           |        |
| M baixo | 66,37      | 65,75    | 60,35      | 72,08     | 66,14  |
| Baixo   | 56,75      | 80,57    | 68,24      | 54,74     | 65,07  |
| Médio   | 84,48      | 60,03    | 70,07      | 67,16     | 70,43  |
| Alto    | 66,96      | 50,97    | 62,60      | 65,70     | 61,56  |
| Média   | 68,64      | 64,33    | 65,31      | 64,92     |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

Os resultados tanto massa seca como das frações de P lábil mostraram pouco incremento do P-fítico em relação ao P glicerolfosfato e P-solúvel (Apêndices O-Z). Com esses resultados também demonstrara-se que o P-fítico, que é o estoque de Po que predomina em solos, tanto em regiões tropicais (GATIBONI et al., 2013b) como em regiões temperadas (CONDRON et al., 1990a), apresenta pouca significância na nutrição de milho e de trigo, devido ser fortemente adsorvido aos oxihidróxidos de Fe e Al. Já o P-glicerolfosfato apresenta potencial de contribuição para as plantas, o que pode estar relacionado com a alta taxa de mineralização (BOWMAN; COLE, 1976). Além disso, a ausência de interação dos níveis de P disponível do solo com a utilização dessas fontes de P nesse estudo, supõe que para o milho e o trigo não há incremento na eficiência de utilização de Po em teores iniciais baixos de P. Estes resultados evidenciam que o acúmulo de P-fítico em relação a compostos lábeis de Po (DNA, fosfolipídios) nos solos é devido principalmente à sua forte interação com os constituintes do solo (DOOLETTE et al., 2010), acompanhado da alta dificuldade dos microrganismos e plantas em mineralizar essas fontes.



## 7 CONCLUSÕES

As plantas de milho e de trigo responderam ao incremento de disponibilidade de P, independentemente do teor inicial no solo tanto no Argissolo Vermelho Amarelo distrófico quanto no Nitossolo Bruno.

O P glicerolfosfato contribui na nutrição de plantas de milho e de trigo, tanto no Argissolo Vermelho Amarelo distrófico quanto no Nitossolo Bruno.

O P fítico contribui pouco no desempenho das plantas de milho e de trigo independente do teor inicial de P disponível e sendo semelhante no Argissolo Vermelho Amarelo distrófico quanto no Nitossolo Bruno.

O P-glicerolfosfato foi detectado principalmente nas frações inorgânicas de P lábil, mostrando que foi mineralizado e evidenciando seu potencial para a nutrição das plantas. Já o P-fítico foi constatado principalmente nas frações orgânicas moderadamente lábeis e não lábeis, evidenciando sua baixa taxa de mineralização e sua forte adsorção com os constituintes do solo.



## **8 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Muitos trabalhos da literatura levantam a hipótese que as plantas podem acessar fontes orgânicas de P através de maior liberação de enzimas que mineralizam o P. No entanto, poucos são os trabalhos que realmente evidenciam esse fato, sendo que em solos tropicais brasileiros há ausência desses estudos. Além disso, os trabalhos existentes não levam em consideração os diferentes níveis de disponibilidade de P do solo, como apresentado nesse estudo.

Esse trabalho mostrou efeito positivo do P-glicerolfosfato, e ausência de efeito do P-fítico sobre a disponibilidade, tanto no rendimento de massa seca, quanto no solo. Isso mostra que para espécies cultivadas com média-alta exigência em P, as fontes orgânicas de P são pouco significantes na nutrição. Por outro lado, formas orgânicas de P lábil são úteis na nutrição e deveriam ser contabilizadas pelos métodos de rotina de análise de solo.





## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L.; MENDOZA, E.; SILVA FILHO, G. N. Microrganismos solubilizadores de fosfatos e o crescimento de pínus e eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 939–947, 2002.

ANDERSON, G. **Soil test – crop response relationships and critical soil test values and ranges**: Making better fertiliser decisions for cropping systems in Western Australia. Western Australian Agriculture Authority, 2015, 38p.

BAIR, K. E.; DAVENPORT, J. R. Plant Available Phosphorus Analysis for Recently Acidified Soils of the Columbia Basin Washington State. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.] v. 77, n. 3, p. 1063–1069, 2013.

BEEGLE, K.F.; DENNING, J. Phosphorus IN: **Recommended Chemical Soil Test Procedures for North Central Region**, [S.l.;s.n], 1998, p.21-26.

BERG, A. S.; JOERN, B. C. Sorption dynamics of organic and inorganic phosphorus compounds in soil. **Journal of Environment Quality**, [S.l.] v. 35, n. 5, p. 1855–1862, 2006.

BOITT, G. **Mineralogia e distribuição das formas de fósforo com diferentes graus de intemperismo**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo. Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

BOLLAND, M. D. A; BRENNAN, R. F.; WHITE, P. F. Comparing responses to phosphorus of field pea (*Pisum sativum*), canola (rape, *Brassica napus*) and spring wheat

(Triticum aestivum). **Australian Journal of Experimental Agriculture**, [S.l.] v. 46, n. 5, p. 645–657, 2006.

BORDA, T. et al. Fertilization strategies affect phosphorus forms and release from soils and suspended solids. **Journal of Environmental Quality**, [S.l.] v. 43, n. 3, p. 1024–1031, 2014.

BOWMAN, R.A.; MOIR, J.O. Basic EDTA as an extractant for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, [S.l.], v., 57, p. 1516-1518, 1993.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by  $\text{NaHCO}_3$  extraction. **Soil Science**, [S.l.], v. 125, n. 1, p. 49–54, 1976.

BUEHLER, S. et al. Sequential phosphorus extraction of a P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 66, n. 3, p. 868–877, 2002.

BÜNEMANN, E. K. et al. Phosphorus dynamics in a Highly Weathered Soil as revealed by isotopic labeling techniques. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 68, n. 5, p. 1645–1655, 2004.

BÜNEMANN, E. K. Assessment of gross and net mineralization rates of soil organic phosphorus – A review. **Soil Biology and Biochemistry**, [S.l.], v. 89, p. 82–98, 2015.

CELI, L. et al. Interaction of inositol Hexaphosphate on clays: adsorption and charging phenomena, **Soil Science**, [S.l.], v. 164, n. 8, p. 574-585, 1999.

CHEN, C. R. et al. Mineralisation of soil orthophosphate monoesters under pine seedlings and ryegrass. **Australian**

**Journal of Soil Research**, [S.l.], v. 42, n. 2, p. 189–196, 2004.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de Adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10º ed. Porto Alegre: SBCS/NRS, 2004, 400 p.

CONDRON, L. M. et al. Chemical nature of organic phosphorus in cultivated and uncultivated soils under different environmental conditions. **Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 41, n. 1, p. 41–50, 1990a.

CONDRON, L. M. et al. Critical evaluation of methods for determining total organic phosphorus in Tropical Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 54, p. 1261–1266, 1990b.

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

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009.

CREWS, T. E.; BROOKES, P. C. Changes in soil phosphorus forms through time in perennial versus annual agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S.l.], v. 184, p. 168–181, 2014.

CROSS, A. F.; SCHLESINGER, W. H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, [S.l.], v. 64, n. 3-4, p. 197–214, 1995.

DAROUB, S. H.; PIERCE, F. J.; ELLIS, B. G. Phosphorus fractions and fate of phosphorus-33 in soils under plowing and no-tillage. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 64, n. 1, p. 170–176, 2000.

DEGRYSE, F. et al. Sequestration of phosphorus-binding cations by complexing compounds is not a viable mechanism to increase phosphorus efficiency. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 77, n. 6, p. 2050–2059, 2013.

DE GROOT, C.J.; GOLTERMAN, H.L. On the presence of organic phosphate in some Camargue sediments—evidence for the importance of phytate. **Hydrobiologia**, [S.l.], v. 252, p.117–126, 1993.

DICK, W. A.; TABATABAY, M. A. Determination of otophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environment Quality**, [S.l.], v. 6, n. 1, p. 82–85, 1977.

DOOLETTE, A. L.; SMERNIK, R. J.; DOUGHERTY, W. J. Rapid decomposition of phytate applied to a calcareous soil demonstrated by a solution  $^{31}\text{P}$  NMR study. **European Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 61, n. 4, p. 563–575, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

ERIKSSON, A. K.; GUSTAFSSON, J. P.; HESTERBERG, D. Phosphorus speciation of clay fractions from long-term fertility experiments in Sweden. **Geoderma**, [S.l.], v. 241-242, p. 68–74, 2015.

ERNANI, P. R.; STECKLINK, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 939–946, 2001.

FILHO, G. S.; NARLOCH, C.; SCHARF, R. Solubilização de fosfatos naturais por microrganismos isolados de cultivos de Pinus e Eucalyptus de Santa Catarina. **Pesquisa Agropecuária**, [S.l.], v. 37, n. 6, p. 847–854, 2002.

FUENTES, B. et al. Sorption of inositol hexaphosphate on desert soils. **Geoderma**, [S.l.], v. 232-234, p. 573–580, 2014.

GAGNON, B. et al. Forms of phosphorus in composts and in compost-amended soils following incubation. **Canadian Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 92, n. 5, p. 711–721, 2012.

GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, [S.l.], v. 118, p. 453–469, 2014.

GATIBONI, L.C et al. Fracionamento Químico das Formas de Fósforo do Solo: Usos e Limitações. In: ARAÚJO, A.P.; ALVES, B.J.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013a. v.8. p.141 - 187.

GATIBONI, L. C. et al. spectroscopic quantification of soil phosphorus forms by <sup>31</sup>P-NMR after nine years of organic or mineral fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 1, p. 640–648, 2013b.

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. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003.

GEORGE, T. S. et al. Depletion of organic phosphorus from Oxisols in relation to phosphatase activities in the rhizosphere. **European Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 57, n. 1, p. 47–57, 2006.

GUARDINI, R. et al. Accumulation of phosphorus fractions in typic Hapludalf soil after long-term application of pig slurry and deep pig litter in a no-tillage system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [S.l.], v. 93, n. 2, p. 215–225, 2012.

GUPPY, C. N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. **Australian Journal of Soil Research**, [S.l.], v. 43, n. 2, p. 189–202, 2005.

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**, [S.l.], v. 46, p. 970–976, 1982.

HAYNES, J.E.; RICHARDSON, A.E.; SIMPSON, R.J. The growth and phosphorus utilisation of plants in sterile media when supplied with inositol hexaphosphate, glucose 1-phosphate or inorganic phosphate. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 220, p.165–174, 2000.

HEUCK, C.; ALFONS, W.; MARIE, S. Soil microbial biomass

C: N: P stoichiometry and microbial use of organic phosphorus. **Soil Biology and Biochemistry**, [S.l.], v. 85, p. 119–129, 2015.

HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soil with different mineralogies. **Soil Science**, [S.l.], v. 152, p. 463–471, 1991.

JOHNSON, B. B.; QUILL, E.; ANGOVE, M. J. An investigation of the mode of sorption of inositol hexaphosphate to goethite. **Journal of Colloid and Interface Science**, [S.l.], v. 367, n. 1, p. 436–442, 2012.

KAMPRATH, E. J. Changes in phosphate availability of Ultisols with long-term cropping. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S.l.], v. 30, p. 909–919, 1999.

LINQUIST, B. A. et al. Residual phosphorus and long-term management strategies for an Ultisol. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 184, n. 1, p. 47–55, 1996.

MACOLINO, S. et al. Phosphorus and potassium fertilizer effects on alfalfa and soil in a non-limited soil. **Agronomy Journal**, [S.l.], v. 105, n. 6, p. 1613–1618, 2013.

MCDOWELL, R. W.; SHARPLEY, A. N. Soil phosphorus fractions in solution: Influence of fertiliser and manure, filtration and method of determination. **Chemosphere**, [S.l.], v. 45, n. 6-7, p. 737–748, 2001.

MCGILL, W. B.; COLE, C. V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. **Geoderma**, [S.l.], v. 26, p. 267–286, 1981.

MCLAREN, T. I. A. et al. Growth and phosphorus uptake of

faba bean and cotton are related to Colwell-P concentrations in the subsoil of Vertosols. **Crop & Pasture Science**, [S.l.], v. 64, p. 825–833, 2013.

MCLAUGHLIN, M. J. et al. The chemical nature of P accumulation in agricultural soils-implications for fertiliser management and design: An Australian perspective. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 349, n. 1-2, p. 69–87, 2011.

MORO, H.; KUNITO, T.; SATO, T. Assessment of phosphorus bioavailability in cultivated Andisols from a long-term fertilization field experiment using chemical extractions and soil enzyme activities. **Archives of Agronomy and Soil Science**, [S.l.], v. 61, n. 8, p. 1107–1123, 2015.

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

NAIDU, R. et al. Effect of liming on phosphate extracted by two soil-testing procedures. **Fertilizer Research**, [S.l.], v. 14, p. 143–152, 1987.

NASH, D. M. et al. Using organic phosphorus to sustain pasture productivity: A perspective. **Geoderma**, [S.l.], v. 221-222, p. 11–19, 2014.

NOACK, S. R. et al. Phosphorus speciation in mature wheat and canola plants as affected by phosphorus supply. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 378, n. 1-2, p. 125–137, 2014.

NOTTINGHAM, A. T. et al. Nitrogen and phosphorus constrain labile and stable carbon turnover in lowland tropical forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, [S.l.], v. 80, p. 26–33, 2015.



PINHEIRO, G. L. et al. Ácidos orgânicos de baixa massa molar em solos e materiais orgânicos. **Química Nova**, [S.l.], v. 36, n. 3, p. 413–418, 2013.

RECENA, R. et al. Accuracy of Olsen P to assess plant P uptake in relation to soil properties and P forms. **Agronomy Sustain. Dev.**, [S.l.], v. 35, p. 1571–1579, 2015.

REQUEJO, M. I.; EICHLER-LÖBERMANN, B. Organic and inorganic phosphorus forms in soil as affected by long-term application of organic amendments. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [S.l.], v. 100, n. 2, p. 245–255, 2014.

RICHARDSON, A. E. et al. Utilization of phosphorus by pasture plants supplied with myo-inositol hexaphosphate is enhanced by the presence of soil micro-organisms. **Plant and Soil**, [S.l.], v. 229, n. 1, p. 47–56, 2001.

RYDEN, J. C.; SYERS, J. K. Origin of the labile phosphate pool in soils. **Soil Science**, [S.l.], v. 123, n. 6, p. 353–361, 1977.

SANTOS, D. R. DOS; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576–586, 2008.

SCHMITT, D. E. et al. Accumulation of phosphorus fractions and contamination potential in vineyard soils in the southern region of the state of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 7, p. 1256–1266, 2013.

SCHMITT, D. E. et al. Phosphorus fractions in the vineyard soil of the Serra Gaúcha of Rio Grande do Sul, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina

Grande, v. 18, n. 2, p. 134–140, 2014.

SCHOENAU, J. J.; HUANG, W. Z. Anion-exchange membrane, water, and sodium bicarbonate extractions as soil tests for phosphorus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S.l.], v. 22, n. 5-6, p. 465–492, 1991.

SHANG, C. et al. Orthophosphate and phytate extraction from soil components by common soil phosphorus tests. **Geoderma**, [S.l.], v. 209-210, p. 22–30, 2013.

SHANG, C.; HUANG, P. M.; STEWART, J. W. B. Kinetics of adsorption of organic and inorganic phosphates by short-range ordered precipitate of aluminum. **Canadian Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 53, n. 3, p. 1–14, 1992.

SHEN, J. et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant physiology**, [S.l.], v. 156, n. 3, p. 997–1005, 2011.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. VAN. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, [S.l.], v. 34, n. 2, p. 267–288, 1999.

SILVA FILHO, G. N.; VIDOR, C. Solubilização de fostatos por microrganismos na presença de fontes de carbono. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 311–319, 2000.

SILVA FILHO, G. N.; VIDOR, C. Atividade de microrganismos solubilizadores de fosfatos na presença de nitrogênio, ferro, cálcio e potássio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.l.], v. 36, n. 12, p. 1495–1508, 2001.

SISVAR- **Versão 5.4**; Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

STEFFENS, D. et al. Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [S.l.], v. 173, n. 5, p. 765–771, 2010.

STEWART, J. W. B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 41–60, 1987.

TEDESCO, M. J et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 174 p. 1995.

TURNER, B. L. et al. Inositol phosphates in the environment. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences**, [S.l.], v. 357, n. 1420, p. 449–469, 2002.

TURNER, B. L.; BLACKWELL, M. S. A. Isolating the influence of pH on the amounts and forms of soil organic phosphorus. **European Journal of Soil Science**, [S.l.], v. 64, n. 2, p. 249–259, 2013.

TURNER, B. L.; CADE-MENUN, B. J.; WESTERMANN, D. T. Organic phosphorus composition and potential bioavailability in semi-arid arable soils of the Western United States. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 67, n. 4, p. 1168–1179, 2003.

TURNER, B. L.; HAYGARTH, P. M. Changes in bicarbonate-extractable inorganic and organic phosphorus by drying pasture soils. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 67, n. 1, p. 344–350, 2003.

TURNER, B. L.; LEYTEM, A. B. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: Chemical speciation and

a novel fractionation procedure. **Environmental Science and Technology**, [S.l.], v. 38, n. 22, p. 6101–6108, 2004.

TURNER, B. L.; MAHIEU, N.; CONDRON, L. M.  
Phosphorus-31 Nuclear Magnetic Resonance Spectral  
Assignments of Phosphorus Compounds in Soil NaOH–EDTA  
Extracts. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v.  
67, n. 2, p. 497–510, 2003a.

TURNER, B. L.; MAHIEU, N.; CONDRON, L. M.  
Quantification of myo-inositol hexakisphosphate in alkaline  
soil extracts by solution <sup>31</sup>P NMR spectroscopy and spectral  
deconvolution. **Soil Science**, [S.l.], v. 168, n. 7, p. 469–478,  
2003b.

WALKER, T. W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during  
pedogenesis. **Geoderma**, [S.l.], v. 15, n. 1, p. 1–19, 1976.

WANG, X.; JACKMAN, J.M.; YOST, R.S.; LINQUIST, B.A.  
Predicting soil phosphorus using potential sorption site density  
and soil aggregation. **Soil Science Society of America  
Journal**, [S.l.], v. 64, p. 240–246, 2000.

WANG, X. et al. Changes in phosphorus fractions at various  
soil depths following long-term P fertiliser application on a  
Black Vertosol from south-eastern Queensland. **Australian  
Journal of Soil Research**, [S.l.], v. 45, n. 7, p. 524–532, 2007.

WEI, S. Y. et al. Surface properties and phosphate adsorption  
of binary systems containing goethite and kaolinite.  
**Geoderma**, [S.l.], v. 213, p. 478–484, 2014.

YANG, K. et al. Effects of exogenous humic acids on forms of  
organic phosphorus in three contrasting types of soil.  
**Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [S.l.],

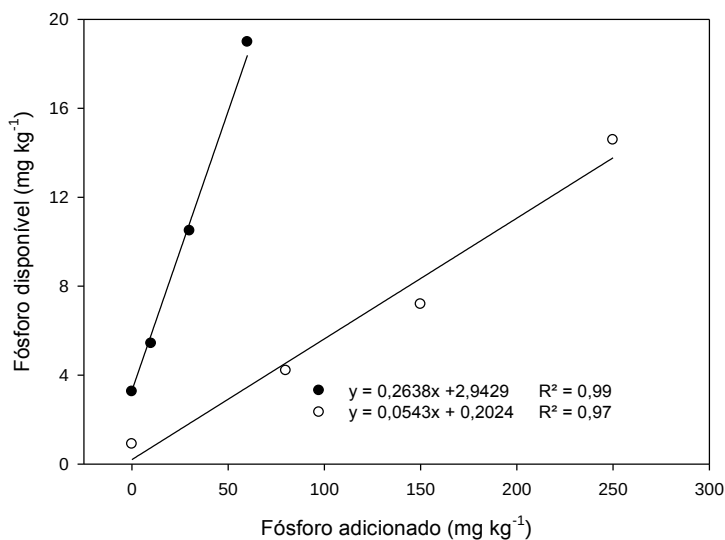
v. 44, n. 14, p. 2095–2106, 2013.

YANG, X.; POST, W. M. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. **Biogeosciences**, [S.l.], v. 8, n. 10, p. 2907–2916, 2011.



## 10 APÊNDICES

APÊNDICE A. Quantidade de fósforo adicionado no solo para elevar os teores de P disponível (Mehlich 1) para alcançar os teores iniciais, baixo, médio e alto no Argissolo Vermelho Amarelo distrófico (círculo preenchido) e no Nitossolo Bruno (círculo não preenchido).



APÊNCICE B. Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo na parte aérea de tecido de milho em função dos teores iniciais de P e das fontes de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,40       | 1,02     | 5,15       | 1,43      | 2,00 b |
| Baixo                                      | 0,68       | 1,52     | 4,46       | 2,15      | 2,20 b |
| Médio                                      | 0,88       | 1,75     | 6,74       | 2,82      | 3,05 a |
| Alto                                       | 1,17       | 2,74     | 4,34       | 3,11      | 2,84 a |
| Média                                      | 0,78C      | 1,76 B   | 5,17 A     | 2,38 B    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 1,12       | 1,19     | 1,59       | 1,67      | 1,39   |
| Baixo                                      | 1,17       | 1,22     | 1,41       | 1,42      | 1,30   |
| Médio                                      | 1,35       | 1,36     | 1,50       | 1,52      | 1,43   |
| Alto                                       | 1,42       | 1,42     | 1,58       | 1,42      | 1,46   |
| Média                                      | 1,26       | 1,30     | 1,52       | 1,51      |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,43       | 1,22     | 8,22       | 2,48      | 3,09 b |
| Baixo                                      | 0,79       | 1,87     | 6,16       | 3,12      | 2,99 b |
| Médio                                      | 1,17       | 2,31     | 10,1       | 4,12      | 4,42 a |
| Alto                                       | 1,65       | 3,94     | 6,97       | 4,41      | 4,24 a |
| Média                                      | 1,01 D     | 2,34 C   | 7,85 A     | 3,53 B    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.



APÊNCICE C. Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo na raiz de milho em função dos teores iniciais de P e das fontes de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,15       | 0,41     | 1,11       | 0,42      | 0,52   |
| Baixo                                      | 0,18       | 0,34     | 0,93       | 0,52      | 0,49   |
| Médio                                      | 0,23       | 0,39     | 1,22       | 0,60      | 0,61   |
| Alto                                       | 0,27       | 0,54     | 0,78       | 0,70      | 0,57   |
| Média                                      | 0,21 C     | 0,42 B   | 1,01 A     | 0,57 B    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,39 aA    | 0,39 bA  | 0,54 bA    | 0,34 bA   | 0,42 b |
| Baixo                                      | 0,38 aB    | 0,60 aA  | 0,48 bB    | 0,41 bB   | 0,47 b |
| Médio                                      | 0,48 aB    | 0,40 bB  | 0,70 aA    | 0,71aA    | 0,57 a |
| Alto                                       | 0,59 aB    | 0,56 aB  | 0,79 aB    | 0,48 bA   | 0,60 a |
| Média                                      | 0,46 B     | 0,49 B   | 0,63 A     | 0,49 B    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,05       | 0,16     | 0,59       | 0,14      | 0,24 b |
| Baixo                                      | 0,07       | 0,21     | 0,47       | 0,21      | 0,24 b |
| Médio                                      | 0,11       | 0,17     | 0,87       | 0,41      | 0,39 a |
| Alto                                       | 0,16       | 0,31     | 0,64       | 0,34      | 0,36 a |
| Média                                      | 0,10 C     | 0,21 B   | 0,64 A     | 0,28 B    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE D. Teor de potássio (K), cálcio (Ca) e nitrogênio (N) na parte aérea de milho nos teores de fósforo muito baixo, baixo, médio e alto em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico. Valores em g kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | K                   | Ca     | N       |
|---------|---------------------|--------|---------|
| M baixo | 64,09 <sup>NS</sup> | 4,39 a | 42,42 a |
| Baixo   | 63,52               | 3,67 b | 41,62 a |
| Médio   | 64,38               | 3,64 b | 37,47 b |
| Alto    | 67,10               | 4,15 a | 36,66 b |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\*. M baixo = muito baixo.

APÊNDICE E. Teor de potássio (K), cálcio (Ca) e nitrogênio (N) na parte aérea de milho no tratamento testemunha, P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho amarelo distrófico. Valores em g kg<sup>-1</sup>.

| Fonte      | K                   | Ca                 | N       |
|------------|---------------------|--------------------|---------|
| Testemunha | 67,41 <sup>NS</sup> | 3,87 <sup>NS</sup> | 45,70 a |
| P-fítico   | 64,64               | 4,03               | 38,60 b |
| P-glicerol | 62,43               | 3,64               | 36,19 b |
| P-solúvel  | 64,62               | 4,23               | 37,66 b |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato;P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel.

APÊNDICE F. Teor de magnésio (Mg) na parte aérea de milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto em nos tratamentos testemunha, P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho amarelo distrófico. Valores em g kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel |
|---------|------------|----------|------------|-----------|
| M baixo | 4,49 bB    | 5,84 aB  | 8,78 aA    | 7,60 aA   |
| Baixo   | 7,69 aA    | 7,37 aA  | 6,20 bA    | 6,25 aA   |
| Médio   | 7,50 aA    | 6,59 aA  | 5,47 bA    | 5,99 aA   |
| Alto    | 7,49 aA    | 7,17 aA  | 6,43 bA    | 5,46 aA   |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* M baixo = muito baixo; P-glicerol= P glicerolfosfato;P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel. Fonte: produção do próprio autor.

APÊNCICE G. Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo na parte aérea de trigo em função dos teores iniciais de P e das fontes de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,40 cC    | 0,52 bC  | 1,05 bB    | 2,29 bA   | 1,06 c |
| Baixo                                      | 0,51 cB    | 0,80 bB  | 0,90 bB    | 2,53 bA   | 1,18 c |
| Médio                                      | 0,93 bC    | 0,77 bC  | 1,36 bB    | 2,80 aA   | 1,47 b |
| Alto                                       | 1,54 aB    | 1,47 aB  | 2,56 aB    | 2,91 aA   | 2,12 a |
| Média                                      | 0,85 C     | 0,90 C   | 1,47 B     | 2,63 A    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,66 bC    | 0,88 aC  | 1,35 bB    | 2,35 bA   | 1,31 b |
| Baixo                                      | 0,89 bB    | 0,90 aB  | 1,27 bA    | 2,80 aA   | 1,47 b |
| Médio                                      | 1,41 aB    | 1,24 aB  | 1,82 aA    | 1,89 bA   | 1,59 a |
| Alto                                       | 1,39 a     | 1,21 a   | 2,18 a     | 2,10 b    | 1,72 a |
| Média                                      | 1,09 C     | 1,06 C   | 1,65 B     | 2,29 A    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,28 bB    | 0,46 aB  | 1,42 cB    | 5,34 bA   | 1,87 b |
| Baixo                                      | 0,46 bB    | 0,72 aB  | 1,13 cB    | 7,01 aA   | 2,33 b |
| Médio                                      | 1,31 aC    | 0,98 aC  | 2,57 bB    | 5,29 bA   | 2,54 b |
| Alto                                       | 2,12 aB    | 1,80 aB  | 5,58 aA    | 6,21 aA   | 3,93 a |
| Média                                      | 1,04 C     | 0,99 C   | 2,68 B     | 5,96 A    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNCICE H Produção de massa seca, concentração e absorção de fósforo na raiz de trigo em função dos teores iniciais de P e das fontes de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,20       | 0,25     | 0,79       | 1,03      | 0,57 b |
| Baixo                                      | 0,45       | 0,52     | 0,96       | 1,30      | 0,58 b |
| Médio                                      | 0,35       | 0,57     | 0,52       | 0,89      | 0,81 a |
| Alto                                       | 0,35       | 0,45     | 0,84       | 1,26      | 0,73 a |
| Média                                      | 0,34 B     | 0,45 B   | 0,78 B     | 1,12 A    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,66       | 0,40     | 0,54       | 0,87      | 0,62 a |
| Baixo                                      | 0,23       | 0,43     | 0,56       | 0,93      | 0,54 b |
| Médio                                      | 0,47       | 0,64     | 0,68       | 0,86      | 0,66 a |
| Alto                                       | 0,41       | 0,39     | 0,52       | 0,81      | 0,53 b |
| Média                                      | 0,44 C     | 0,46 C   | 0,58 B     | 0,87 A    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,13       | 0,10     | 0,43       | 0,90      | 0,39   |
| Baixo                                      | 0,11       | 0,21     | 0,51       | 1,11      | 0,40   |
| Médio                                      | 0,17       | 0,36     | 0,36       | 0,73      | 0,46   |
| Alto                                       | 0,15       | 0,17     | 0,47       | 1,04      | 0,48   |
| Média                                      | 0,14 B     | 0,21 B   | 0,44 B     | 0,94 A    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE I. Teor de potássio (K) magnésio (Mg), Cálcio (Ca) e Nitrogênio (N) na parte aérea de trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto em nos tratamentos testemunha, P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho amarelo distrófico. Valores em g kg<sup>-1</sup>.

|         | Testemunha    | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel |
|---------|---------------|----------|------------|-----------|
| Teor P  | ----- K ----- |          |            |           |
| M baixo | 41,08 bC      | 47,71 aB | 51,76 aB   | 65,00 aA  |
| Baixo   | 41,01 bB      | 43,18 aB | 47,60 aB   | 56,00 bA  |
| Médio   | 51,02 aA      | 43,72 aB | 54,67 aA   | 51,57 bA  |
| Alto    | 52,39 aA      | 49,61 aA | 57,36 aA   | 56,20 bA  |
|         | -----Mg-----  |          |            |           |
| M baixo | 2,10 aB       | 1,97 aB  | 2,34 aA    | 1,98 aB   |
| Baixo   | 2,20 aA       | 2,03 aA  | 1,89 bA    | 2,06 aA   |
| Médio   | 1,92 aA       | 2,01 aA  | 1,91 bA    | 1,63 bB   |
| Alto    | 1,48 bA       | 1,63 bA  | 1,62 cA    | 1,55 bA   |
|         | -----Ca ----- |          |            |           |
| M baixo | 0,90 bB       | 0,92 bB  | 1,25 aA    | 1,29 aA   |
| Baixo   | 1,06 bB       | 0,90 bB  | 1,18 aB    | 1,48 aA   |
| Médio   | 1,23 aA       | 1,28 aA  | 1,40 aA    | 1,27 aA   |
| Alto    | 1,01 bB       | 1,11 aB  | 1,21 aB    | 1,45 aA   |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* M baixo = muito baixo; P-glicerol= P glicerolfosfato;P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel. Fonte: produção do próprio autor.

## APÊNDICE I: Continua.

| Teor P                          | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel |
|---------------------------------|------------|----------|------------|-----------|
| -----N g kg <sup>-1</sup> ----- |            |          |            |           |
| M baixo                         | 54,64 aA   | 49,01 aA | 43,08 aB   | 43,00 aB  |
| Baixo                           | 48,62 bA   | 41,63 aB | 38,94 aB   | 36,39 aB  |
| Médio                           | 40,14 cA   | 45,35 aA | 40,71 aA   | 41,64 aA  |
| Alto                            | 45,29 cA   | 43,58 aA | 41,38 aA   | 42,37 aA  |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* M baixo = muito baixo; P-glicerol= P glicerolfosfato;P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel. Fonte: produção do próprio autor.



APÊNCICE J. Produção de massa seca de parte aérea, concentração e absorção de fósforo no tecido de milho nos teores iniciais de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Nitossolo Bruno após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,41       | 0,57     | 1,64       | 0,77      | 0,85   |
| Baixo                                      | 0,52       | 0,55     | 1,26       | 0,68      | 0,75   |
| Médio                                      | 0,68       | 0,90     | 1,22       | 0,89      | 0,92   |
| Alto                                       | 0,69       | 0,69     | 1,56       | 0,83      | 0,94   |
| Média                                      | 0,57 C     | 0,68 C   | 1,42 A     | 0,79 B    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,66 bB    | 0,66 bB  | 1,32 bB    | 0,89 aA   | 0,88 b |
| Baixo                                      | 0,98 aB    | 1,11 aB  | 1,62 aB    | 1,01 aA   | 1,18 a |
| Médio                                      | 1,25 aA    | 1,30 aA  | 1,18 bA    | 1,22 aA   | 1,24 a |
| Alto                                       | 1,02 aB    | 0,92 bB  | 1,28 bB    | 0,90 aA   | 1,03 b |
| Média                                      | 0,98 B     | 1,00 B   | 1,35 A     | 1,00 B    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,27 aB    | 0,38 bB  | 2,12 aA    | 0,74 aB   | 0,88 a |
| Baixo                                      | 0,51 aB    | 0,62 bB  | 1,99 aA    | 0,68 aB   | 0,95 a |
| Médio                                      | 0,83 aA    | 1,16 aA  | 1,43 bA    | 1,05 aA   | 1,12 a |
| Alto                                       | 0,70 aB    | 0,63 bB  | 1,98 aA    | 0,75 aB   | 1,01 a |
| Média                                      | 0,58 B     | 0,70 B   | 1,89 A     | 0,80 B    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNCICE K. Produção de massa seca de raízes, concentração e absorção de fósforo no tecido de milho nos teores iniciais de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel e uma testemunha sem adição de P em um Nitossolo Bruno após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,32       | 0,43     | 0,93       | 0,57      | 0,56 b |
| Baixo                                      | 0,41       | 0,43     | 0,74       | 0,52      | 0,53 b |
| Médio                                      | 0,60       | 0,72     | 0,99       | 0,63      | 0,73 a |
| Alto                                       | 0,65       | 0,60     | 0,78       | 0,66      | 0,67 a |
| Média                                      | 0,50 B     | 0,54 B   | 0,86 A     | 0,59 B    |        |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,39 bA    | 0,47 bA  | 0,55 cA    | 0,60 aA   | 0,50 c |
| Baixo                                      | 0,62 bB    | 0,58 bB  | 0,85 bA    | 0,51 aB   | 0,64 b |
| Médio                                      | 0,56 bB    | 0,94 aA  | 1,10 aA    | 0,83 aA   | 0,86 a |
| Alto                                       | 0,95 aA    | 0,79 aB  | 1,12 aA    | 0,75 bB   | 0,90 a |
| Média                                      | 0,63 B     | 0,69 B   | 0,91 A     | 0,67 B    |        |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |        |
| M baixo                                    | 0,13       | 0,21     | 0,52       | 0,35      | 0,30 b |
| Baixo                                      | 0,26       | 0,25     | 0,67       | 0,26      | 0,36 b |
| Médio                                      | 0,33       | 0,65     | 1,06       | 0,54      | 0,64 a |
| Alto                                       | 0,66       | 0,47     | 0,87       | 0,49      | 0,62 a |
| Média                                      | 0,34 B     | 0,39 B   | 0,78 A     | 0,41 B    |        |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE L. Teor de potássio (K) e Cálcio (Ca) na parte aérea de milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto em nos tratamentos testemunha, P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno. Valores em g kg<sup>-1</sup>.

| Teor P       | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel |
|--------------|------------|----------|------------|-----------|
| -----K-----  |            |          |            |           |
| M baixo      | 33,18 bB   | 36,92 aA | 33,83 aB   | 39,12 aA  |
| Baixo        | 38,71 aA   | 39,20 aA | 34,99 aB   | 34,03 bB  |
| Médio        | 36,09 aA   | 33,96 bA | 27,84 bB   | 29,08 cB  |
| Alto         | 31,14 bA   | 30,94 bA | 27,22 bA   | 28,74 cA  |
| -----Ca----- |            |          |            |           |
| M baixo      | 2,24 aB    | 2,03 aA  | 1,60 aB    | 1,87 aB   |
| Baixo        | 1,96 aB    | 1,41 bB  | 1,16 aB    | 1,13 bB   |
| Médio        | 1,25 bA    | 1,59 bA  | 1,51 aA    | 1,29 bA   |
| Alto         | 1,27 bB    | 1,38 bB  | 1,66 aA    | 1,73 aA   |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\* M baixo = muito baixo; P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel. Fonte: produção do próprio autor.

APÊNDICE M. Teor de magnésio (Mg) na parte aérea de milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio, alto e nos tratamentos testemunha, P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno. Valores em g kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | ----Mg---- | Fonte      | ----Mg----         |
|---------|------------|------------|--------------------|
| M baixo | 5,68 b     | Testemunha | 6,04 <sup>NS</sup> |
| Baixo   | 5,64 b     | P-fítico   | 5,52               |
| Médio   | 6,20 a     | P-glicerol | 5,88               |
| Alto    | 5,67 b     | P-solúvel  | 5,73               |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%. \*\*NS = não significativo. M baixo = muito baixo; P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel. Fonte: produção do próprio autor.

APÊNDICE N. Teor de Nitrogênio (N) na parte aérea de milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio, alto e nos tratamentos testemunha, P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno. Valores em g kg<sup>-1</sup>.

| Teor P  | ----N---            | Fontes     | ----N----           |
|---------|---------------------|------------|---------------------|
| M baixo | 32,69 <sup>NS</sup> | Testemunha | 31,95 <sup>NS</sup> |
| Baixo   | 33,05               | P-fítico   | 32,67               |
| Médio   | 32,82               | P-glicerol | 33,46               |
| Alto    | 32,39               | P-solúvel  | 33,86               |

\*médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo teste de Scott-knot a 5%.\*\*NS = não significativo. M baixo = muito baixo; P-glicerol= P glicerolfosfato;P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel. Fonte: produção do próprio autor.

APÊNCICE O. Percentagem de incremento de massa seca (raiz + parte aérea), concentração e absorção de fósforo em relação a testemunha no tecido de trigo nos teores iniciais de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico após o cultivo de milho.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|-------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 160,00   | 1040       | 236,36    | -     |
| Baixo                                      | -          | 116,28   | 526,74     | 210,47    | 6,75  |
| Médio                                      | -          | 92,79    | 617,12     | 208,11    | 45,24 |
| Alto                                       | -          | 128,67   | 258,04     | 167,13    | 35,32 |
| Média                                      | -          | 120,20   | 524,24     | 196,97    | -     |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 4,35     | 53,26      | 48,91     | -     |
| Baixo                                      | -          | 11,00    | 24,00      | 22,00     | -1,72 |
| Médio                                      | -          | 0,00     | 16,95      | 16,95     | 10,34 |
| Alto                                       | -          | 2,38     | 16,67      | -0,79     | 13,79 |
| Média                                      | -          | 3,67     | 25,69      | 20,18     | -     |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 181,63   | 1700       | 434,69    | -     |
| Baixo                                      | -          | 141,86   | 670,93     | 287,21    | -3,30 |
| Médio                                      | -          | 92,25    | 747,29     | 251,16    | 44,44 |
| Alto                                       | -          | 134,81   | 319,89     | 162,43    | 38,14 |
| Média                                      | -          | 129,73   | 665,77     | 243,24    | -     |

\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo, Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNCICE P. Percentagem de incremento de massa seca, concentração e absorção de fósforo em relação a testemunha no tecido de trigo nos teores iniciais de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|-------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 28,33    | 206,67     | 436,67    | -     |
| Baixo                                      | -          | 37,50    | 93,75      | 298,96    | 22,09 |
| Médio                                      | -          | 4,69     | 46,88      | 188,28    | 25,77 |
| Alto                                       | -          | 1,05     | 79,47      | 119,47    | 74,85 |
| Média                                      | -          | 13,56    | 116,95     | 217,80    | -     |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 10,45    | 47,76      | 180,60    | -     |
| Baixo                                      | -          | 24,14    | 55,17      | 282,76    | 3,74  |
| Médio                                      | -          | -15,52   | 28,45      | 43,10     | 23,36 |
| Alto                                       | -          | -16,39   | 47,54      | 40,16     | 34,58 |
| Média                                      | -          | -4,40    | 41,76      | 105,49    | -     |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 40,00    | 362,50     | 1460,00   | -     |
| Baixo                                      | -          | 63,16    | 187,72     | 1326,32   | 24,34 |
| Médio                                      | -          | -8,78    | 97,97      | 306,76    | 30,09 |
| Alto                                       | -          | -12,78   | 167,84     | 219,38    | 94,25 |
| Média                                      | -          | 1,69     | 164,41     | 485,59    | -     |

\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo, Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNCICE Q. Percentagem de incremento de massa seca, concentração e absorção de fósforo em relação a testemunha no tecido de milho nos teores iniciais de P disponível muito baixo, baixo, médio e alto em função da aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno.

| Teor P                                     | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média |
|--------------------------------------------|------------|----------|------------|-----------|-------|
| Massa seca (g vaso <sup>-1</sup> )         |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 26,03    | 216,44     | 83,56     | -     |
| Baixo                                      | -          | 5,38     | 115,05     | 27,96     | -3,76 |
| Médio                                      | -          | 27,78    | 75,40      | 18,25     | 24,06 |
| Alto                                       | -          | 10,26    | 100,00     | 29,91     | 18,05 |
| Média                                      | -          | 17,65    | 117,65     | 35,29     | -     |
| Fósforo no tecido (g kg <sup>-1</sup> )    |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 7,41     | 94,44      | 22,22     | -     |
| Baixo                                      | -          | 18,92    | 81,08      | 6,76      | 32,39 |
| Médio                                      | -          | 19,15    | 20,21      | 22,34     | 52,11 |
| Alto                                       | -          | -14,00   | 22,00      | -14,00    | 38,03 |
| Média                                      | -          | 8,86     | 50,63      | 8,86      | -     |
| Fósforo absorvido (mg vaso <sup>-1</sup> ) |            |          |            |           |       |
| M baixo                                    | -          | 51,28    | 576,92     | 110,26    | -     |
| Baixo                                      | -          | 14,47    | 248,68     | 25,00     | 18,02 |
| Médio                                      | -          | 78,22    | 147,52     | 57,43     | 54,95 |
| Alto                                       | -          | 0,92     | 161,47     | 12,84     | 41,44 |
| Média                                      | -          | 32,93    | 224,39     | 40,24     | -     |

\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= fítico; P-solúvel = P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo, Fonte: próprio autor, 2016.



APÊNDICE R – Percentagem de incremento de fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiBIC) em relação a testemunha após o cultivo do milho e trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| PiRTA   |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | 30,20    | 202,01     | 363,76    | -      |
| Baixo   | -          | -5,12    | 81,02      | 78,31     | 23,99  |
| Médio   | -          | 16,53    | 146,86     | 167,78    | 135,04 |
| Alto    | -          | 5,85     | 17,55      | 51,60     | 140,16 |
| Média   | -          | 8,64     | 81,78      | 115,89    | -      |
| PiBIC   |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | 0,00     | 23,47      | 32,77     | -      |
| Baixo   | -          | 14,64    | 40,08      | 27,36     | 11,43  |
| Médio   | -          | 19,97    | 31,62      | 33,28     | 45,37  |
| Alto    | -          | -2,88    | 12,49      | 25,94     | 126,32 |
| Média   | -          | 6,14     | 23,86      | 29,00     | -      |

\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel (( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE S – Percentagem de incremento de fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-I) e 0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-II) em relação a testemunha após o cultivo do milho e de trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| PiOH-I  |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | -1,76    | -0,94      | 5,14      | -      |
| Baixo   | -          | 12,12    | 20,55      | 8,39      | 1,49   |
| Médio   | -          | -0,35    | 34,71      | 37,24     | 38,92  |
| Alto    | -          | -0,72    | 17,58      | 30,17     | 102,35 |
| Média   | -          | 1,55     | 18,47      | 22,70     | -      |
| PiOH-II |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | -3,21    | -10,69     | -5,34     | -      |
| Baixo   | -          | 8,00     | 34,05      | 36,41     | 18,90  |
| Médio   | -          | 6,73     | -3,44      | 9,26      | 37,61  |
| Alto    | -          | 1,54     | -23,49     | 2,31      | 38,73  |
| Média   | -          | 4,55     | -3,55      | 9,26      | -      |

\* P-glicerol= P-glicerolfosfato; P-fítico=P-fítico; P-solúvel= P-solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE T – Percentagem de incremento de fósforo inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup> (PiHCl) e fósforo residual (PRES) em relação a testemunha após o cultivo do milho e trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol<br>PiHCl | P-solúvel | Média |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|-------|
| M baixo | -          | 34,42    | 23,91               | 32,97     | -     |
| Baixo   | -          | 18,93    | 4,10                | 0,00      | 0,00  |
| Médio   | -          | 20,00    | 34,40               | 37,33     | 35,99 |
| Alto    | -          | -6,74    | -1,82               | -8,93     | 54,87 |
| Média   | -          | 12,93    | 13,19               | 12,14     | -     |
| PRES    |            |          |                     |           |       |
| M baixo | -          | 1,44     | -5,20               | -1,17     | -     |
| Baixo   | -          | 5,85     | -11,59              | -4,42     | -3,67 |
| Médio   | -          | -9,32    | -5,47               | -10,58    | -1,70 |
| Alto    | -          | 6,23     | -0,72               | 26,59     | 5,78  |
| Média   | -          | 0,88     | -5,75               | 2,33      | -     |

\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico=P fítico; P-solúvel= P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE U – Percentagem de incremento de fósforo orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (PoBIC),  $\text{NaOH}$  0,1 mol L<sup>-1</sup> (PoOH-I) e por  $\text{NaOH}$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (PoOH-II) em relação a testemunha após o cultivo do milho e trigo nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| PoBIC   |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | -11,67   | -31,42     | -4,49     | -      |
| Baixo   | -          | 52,41    | 39,38      | 26,63     | -6,92  |
| Médio   | -          | 51,05    | 34,03      | 73,30     | 8,55   |
| Alto    | -          | 49,11    | -14,73     | 137,05    | -34,83 |
| Média   | -          | 27,97    | 3,96       | 43,27     | -      |
| PoOH-I  |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | 17,59    | -36,99     | -10,88    | -      |
| Baixo   | -          | 130,68   | 109,12     | 64,99     | 18,20  |
| Médio   | -          | 19,32    | -0,74      | -20,34    | 26,08  |
| Alto    | -          | -9,55    | -24,77     | -30,96    | 10,83  |
| Média   | -          | 27,26    | -0,14      | -8,07     | -      |
| PoOH-II |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | -32,06   | -49,44     | -8,97     | -      |
| Baixo   | -          | -24,17   | -22,31     | -37,87    | -2,54  |
| Médio   | -          | -16,24   | 25,48      | 6,02      | 16,67  |
| Alto    | -          | -17,71   | 9,81       | 1,50      | 43,00  |
| Média   | -          | -22,63   | -9,47      | -9,66     | -      |

\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico = P fítico; P-solúvel= P solúvel ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE V – Percentagem de incremento de fósforo inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (PiRTA) e NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiBIC) em relação a testemunha após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol<br>PiRTA | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|--------|
| M baixo | -          | 20,28    | 55,31               | 25,89     | -      |
| Baixo   | -          | 13,17    | 15,39               | 10,45     | 36,03  |
| Médio   | -          | -2,31    | 32,99               | 3,78      | 51,26  |
| Alto    | -          | 26,37    | 48,74               | 13,49     | 120,33 |
| Média   | -          | 14,64    | 37,61               | 12,06     | -      |
| PiBIC   |            |          |                     |           |        |
| M baixo | -          | 14,76    | -9,96               | 14,76     | -      |
| Baixo   | -          | 23,37    | 72,19               | 56,21     | 66,32  |
| Médio   | -          | 6,45     | 21,38               | 15,09     | 147,02 |
| Alto    | -          | 10,09    | 12,62               | 10,19     | 306,32 |
| Média   | -          | 11,57    | 21,07               | 18,65     | -      |

\* P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APENDICE X – Percentagem de incremento de fósforo inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-I) e 0,5 mol L<sup>-1</sup> (PiOH-II) em relação a testemunha após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|------------|-----------|--------|
| PiOH-I  |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | 13,27    | 24,70      | 16,20     | -      |
| Baixo   | -          | 7,07     | 17,58      | 10,72     | 44,60  |
| Médio   | -          | 0,00     | 12,34      | 2,31      | 79,64  |
| Alto    | -          | 10,28    | 17,09      | 16,56     | 136,95 |
| Média   | -          | 7,07     | 11,15      | 16,93     | -      |
| PiOH-II |            |          |            |           |        |
| M baixo | -          | -11,39   | -5,18      | -18,28    | -      |
| Baixo   | -          | -12,09   | 3,54       | -10,68    | 22,20  |
| Médio   | -          | 2,51     | 16,26      | 13,14     | 30,51  |
| Alto    | -          | 21,83    | 33,33      | 26,73     | 58,36  |
| Média   | -          | 0,78     | 12,74      | 3,78      | -      |

\* P-glicerol= P-glicerolfosfato; P-fítico=P-fítico; P-solúvel= P-solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE Y – Percentagem de incremento de fósforo inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup> (PiHCl) e fósforo residual (PRES) em relação a testemunha após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol<br>PiHCl | P-solúvel | Média  |
|---------|------------|----------|---------------------|-----------|--------|
| M baixo | -          | -14,29   | -19,05              | -4,76     | -      |
| Baixo   | -          | 0,00     | 12,57               | 9,58      | 54,39  |
| Médio   | -          | -6,25    | -10,42              | -7,64     | 18,42  |
| Alto    | -          | 42,53    | 25,29               | -9,20     | -12,28 |
| Média   | -          | 1,53     | 0,76                | -1,53     | -      |
| PRES    |            |          |                     |           |        |
| M baixo | -          | 8,99     | 16,24               | -10,25    | -      |
| Baixo   | -          | -17,90   | -6,37               | -2,28     | -4,86  |
| Médio   | -          | -4,41    | -11,95              | -0,14     | -3,97  |
| Alto    | -          | 3,48     | -1,59               | 13,00     | 5,31   |
| Média   | -          | -2,62    | -1,10               | 0,22      | -      |

\*P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico=P fítico; P-solúvel= P solúvel ((Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.

APÊNDICE Z – Percentagem de incremento de fósforo orgânico extraído por  $\text{NaHCO}_3$  0,5 mol L<sup>-1</sup> (PoBIC), NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>(PoOH-I) e por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> (PoOH-II) em relação a testemunha após o cultivo do milho nos teores iniciais de P muito baixo, baixo, médio e alto com aplicação de P-fítico, P-glicerolfosfato e P-solúvel em um Nitossolo Bruno.

| Teor P  | Testemunha | P-fítico | P-glicerol | P-solúvel | Média |
|---------|------------|----------|------------|-----------|-------|
| PoBIC   |            |          |            |           |       |
| M baixo | -          | 8,36     | 6,38       | 4,14      | -     |
| Baixo   | -          | -22,62   | -13,74     | -31,17    | 4,38  |
| Médio   | -          | 5,47     | 13,37      | 4,71      | 8,07  |
| Alto    | -          | -16,91   | 8,49       | -5,01     | 14,33 |
| Média   | -          | -7,86    | 2,88       | -8,17     | -     |
| PoOH-I  |            |          |            |           |       |
| M baixo | -          | 39,39    | -1,50      | 23,40     | -     |
| Baixo   | -          | -10,69   | -19,18     | -27,04    | 4,21  |
| Médio   | -          | 35,04    | 1,58       | 10,03     | 12,65 |
| Alto    | -          | 19,82    | 3,84       | 5,96      | 11,49 |
| Média   | -          | 18,61    | -4,61      | 0,90      | -     |
| PoOH-II |            |          |            |           |       |
| M baixo | -          | -0,93    | -9,07      | 8,60      | -     |
| Baixo   | -          | 41,97    | 20,25      | -3,54     | -1,62 |
| Médio   | -          | -28,94   | -17,06     | -20,50    | 6,49  |
| Alto    | -          | -23,88   | -6,51      | -1,88     | -6,92 |
| Média   | -          | -6,28    | -4,85      | -5,42     | -     |

\*P-glicerol= P glicerolfosfato; P-fítico= P fítico; P-solúvel= P solúvel ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ); M baixo= Muito baixo. Fonte: próprio autor, 2016.