



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

NILSON DARLAN VIEIRA

**RESPOSTA DA SOJA A FONTES E DOSES DE FÓSFORO  
EM SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE ARGILA**

**NILSON DARLAN VIEIRA**

**RESPOSTA DA SOJA A FONTES E DOSES DE FÓSFORO  
EM SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE ARGILA**

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós Graduação em Agronomia  
da Universidade Estadual de Londrina, como  
requisito para a obtenção do Título de  
Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Adônis Moreira

Londrina  
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de  
Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

V658 Vieira, Nilson Darlan

Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores  
de argila / Nilson Darlan Vieira. - Londrina, 2021.  
90 f. : il.

Orientador: Dr. Adônis Moreira.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina,  
Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em  
Agronomia, 2021. Inclui bibliografia.

1. Glycine max - Tese. 2. Índice de eficiência agronômica - Tese. 3.  
Fertilizante Fosfatado - Tese. 4. Rendimento de grãos - Tese. I. Moreira, Dr.  
Adônis. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias.  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

# **RESPOSTA DA SOJA A FONTES E DOSES DE FÓSFORO EM SOLOS COM DIFERENTES TEORES DE ARGILA**

Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós Graduação em Agronomia  
da Universidade Estadual de Londrina, como  
requisito para a obtenção do Título de  
Mestre em Agronomia.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Adônis Moreira  
Universidade Estadual de Londrina – UEL

---

Prof. Dr. João Batista Rodrigues de Abreu  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

---

Prof. Dr. Reges Heinrichs  
Universidade Estadual Paulista - UNESP

Londrina, 23 de Fevereiro de 2021.

**OFEREÇO**

A minha esposa Karina Yoshii e minhas filhas Ana Carolina e Maria Eduarda, que sempre compreenderam minha ausência para estudar e me apoiaram em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

Aos meus pais, Niverson (in memorian) e Carmelita, pelo amor e pela oportunidade de estudar, também aos meus irmãos Dagoberto e Cristiane pelo apoio.

**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por conseguir concluir este curso.

À Universidade Estadual de Londrina (UEL), pela oportunidade oferecida.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Adônis Moreira, pelas sugestões, paciência e confiança na orientação deste trabalho.

À Embrapa Soja onde o trabalho e os experimentos foram desenvolvidos.

Aos amigos da Embrapa Soja Dr. André Moraes, Dra. Larissa Alexandra Cardoso Moraes e a Dra. Silvana Rockenbach pelo auxílio nos trabalhos de correção da dissertação e pela amizade.

Ao Dr. Pedro Moreira pelo incentivo para a realização deste mestrado.

Aos colegas técnicos e assistentes da Embrapa Soja pelo auxílio nos experimentos em casa e vegetação.

À Dra. Florinda Miyaoka (UFPR) pelo apoio nas correções da dissertação.

Ao amigo Dr. Rodrigo Marubaiashi (UEL) pelo apoio à realização das análises estatísticas dos dados.

Aos professores da UEL Dra. Juliana Aparecida de Souza e o Dr. Pedro Vendrame pelas sugestões e correções da banca de qualificação.

À todos os professores do curso de pós-graduação em agronomia (UEL), especialmente aos professores Dra. Inês Cristina Batista Fonseca, Dr. Marco Antônio Nogueira, Dr. Amarildo Pasini, Dra. Maria de Fátima Guimarães, Dr. Otávio Jorge Grigoli Abi Saab, Dr. Ricardo Ralisch e Dr. Claudemir Zucareli que muito me ensinaram durante esse curso.

Aos amigos e colegas do curso de pós-graduação, pelo apoio, amizade e incentivo.

À CAPES pelos recursos financeiros fornecidos para realização do trabalho.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

**MUITO OBRIGADO.**

VIEIRA, Nilson Darlan. **Resposta da soja a fontes e doses de fósforo em solos com diferentes teores de argila.** 2021 90f. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2021.

## RESUMO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma cultura com alto potencial produtivo e grande importância no mundo devido a sua composição química, valor nutritivo, relevância social e econômica para os países produtores. Entretanto, o potencial produtivo e a qualidade dos grãos são impactados pelos fatores de produção e técnicas de manejo. O manejo adequado de fertilizantes e corretivos, permite a absorção de nutrientes necessários para o desenvolvimento e alta produtividade. Especificamente, a deficiência de fósforo (P) reduz o desenvolvimento vegetativo, a produtividade, a qualidade e causa senescência precoce, por outro lado, o uso excessivo do P pode afetar a sustentabilidade agrícola e ambiental. Neste contexto, foi desenvolvido este estudo em condições de casa de vegetação com o objetivo de avaliar a eficiência agronômica de fontes e doses de fósforo (P) na soja cultivada em dois solos, Neossolo Quartzarênico distrófico (RQd) com textura arenosa e Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico (LPVAe) com textura argilosa e baixa concentração de P. O delineamento experimental foi inteiramente causalizado com três repetições por tratamento. Foram empregadas quatro doses de P (0, 50, 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>) e quatro fontes superfosfato triplo (SFT), fosfato natural reativo da Argélia (FNRAr), fosfato natural de Alvorada (FNAI) e fosfato decantado (Supraphos). Os resultados evidenciaram os maiores Índices de Eficiência Agronômica (IEA) e Equivalente Superfosfato Triplo EqSFT com aplicação de FNRAr e o Supraphos. Os extractores Mehlich1 e Resina apresentam uma alta correlação entre si e foram eficientes na avaliação do P disponível. As doses de P aplicadas aumentaram a produção de massa seca de parte aérea (MSPA), número de vagens por vaso (NV) e o peso de grãos (PG) em ambos os solos. O SFT e o FNRAr proporcionaram a maior produção de MSPA, NV e PG, entra as fontes. A fonte Supraphos elevou significativamente o teor cálcio (Ca) em todas as doses no solo argiloso, enquanto em solo arenoso não houve diferença entre as fontes e doses. As variações de pH causadas pelas fontes estudadas ficaram em 4,5 e 6,5 e não resultaram em prejuízo na absorção de nutrientes. As doses e fontes de P não afetaram a absorção de Zn. Em solo com maior teor de argila são necessárias maiores doses de P, do que em solos arenosos, mesmo utilizando fosfatos mais solúveis, devido a maior fixação de P pelo solo argiloso.

**Palavras chave:** *Glycine max*, Índice de eficiencia agronômica, Fertilizante Fosfatado, Rendimento de grãos.

VIEIRA, Nilson Darlan. **Response of soybean to sources and doses of phosphorus in soils with different clay contents.** 2021 90f. Master's Dissertation in Agronomy - State University of Londrina, Londrina. 2021.

## ABSTRACT

The soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) is a crop with high productive potential and great importance in the world due to its chemical composition, nutritional value, social and economic relevance for producing countries. However, the productive potential and the quality of the grains are impacted by the production factors and handling techniques. The proper management of fertilizers and correctives, allows the absorption of nutrients necessary for development and high productivity. Specifically, phosphorus (P) deficiency reduces vegetative development, productivity, quality and causes early senescence, on the other hand, the excessive use of P can affect agricultural and environmental sustainability. In this context, this study was carried out under greenhouse conditions with the objective of evaluating the agronomic efficiency of sources and doses of phosphorus (P) in soybeans grown in two soils, dystrophic Quartzarenic Neossolo (RQd) with sandy texture and Red Yellow Latosol eutrophic (LPVAe) with clay texture and low concentration of P. The experimental design was entirely causalized with three replicates per treatment. Four doses of P (0, 50, 100 and 200 mg kg<sup>-1</sup>) and four sources of triple superphosphate (SFT), reactive natural phosphate from Algeria (FNRAr), natural phosphate from Alvorada (FNAI) and decanted phosphate (Supraphos) were used. The results showed the highest Agronomic Efficiency Indices (IEA) and EqSFT Triple Superphosphate Equivalent with application of FNRAr and Supraphos. The Mehlich1 and Resina extractors have a high correlation with each other and were efficient in assessing the available P. The doses of P applied increased the production of shoot dry matter (MSPA), number of pods per pot (NV) and the weight of grains (PG) in both soils. SFT and FNRAr provided the largest production of MSPA, NV and PG, among the sources. The Supraphos source significantly increased the calcium (Ca) content in all doses in the clay soil, while in sandy soil there was no difference between the sources and doses. The pH variations caused by the studied sources were 4.5 and 6.5 and did not result in a loss in the absorption of nutrients. The doses and sources of P did not affect the absorption of Zn. In soil with a higher clay content, higher doses of P are needed, than in sandy soils, even using more soluble phosphates, due to the greater P fixation by the clay soil.

**Keywords:** *Glycine max*, Agronomic efficiency index, Phosphate Fertilizer, Grain Yield.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b>	Possível ação da hidrólise de alumínio ( $Al^{3+}$ ) na fixação do fósforo (P).....	23
<b>Figura 2</b>	Dinâmica do fósforo no solo.....	24
<b>Figura 3</b>	Correlação entre os métodos Resina (X) e Mehlich1 (Y) nas amostras coletadas no final do experimento com os tratamentos com SFT, FNRAr, Supraphos e FNAI nos solos argiloso e arenoso.....	58
<b>Figura 4</b>	Peso de grãos (PG) em função de doses e fontes de P, fosfato natural de Alvorada (FNAI), fosfato natural reativo da Argélia (FNRAr), Supraphos e superfosfato triplo (SFT) em solo argiloso e arenoso. Os pontos são a média de três repetições.....	73

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	Teores totais de P no solo Brasil.....	26
<b>Tabela 2</b>	Formas de P nos solos.....	27
<b>Tabela 3</b>	Interpretação de análise de solo para P extraído pelo método Mehlich1, de acordo com o teor de argila, em sistemas de sequeiro em culturas anuais .....	38
<b>Tabela 4</b>	Interpretação de análise de solo para P extraído pelo método da resina em culturas anuais.....	38
<b>Tabela 5</b>	Principais atributos dos solos antes da aplicação dos tratamentos.....	43
<b>Tabela 6</b>	Composições das soluções usadas no ensaio .....	44
<b>Tabela 7</b>	Características dos adubos fosfatados.....	45
<b>Tabela 8</b>	Solos, fontes e doses dos adubos fosfatados.....	46
<b>Tabela 9</b>	Teor de fósforo (P) pelo metodo Mehlich1 (P Meh1) e Resina (P Res), pH, cálcio (Ca) e zinco (Zn) no solo influenciado pela fonte e dose de P em solo argiloso.....	50
<b>Tabela 10</b>	Teor de P pelo metodo Mehlich1 e Resina, pH, Ca e Zn no solo influenciado pela fonte e de P em solo arenoso de doses de fosforo aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso.....	51
<b>Tabela 11</b>	Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas fósforo pelo método Mehlich1, Resina, cálcio e zinco em no solo (Y), como variável dependente de doses de P aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso.....	52
<b>Tabela 12</b>	Teor d P e Zn na folha e no grão influenciado pela fonte e dose de P em solo argiloso.....	63

<b>Tabela 13</b>	Teor de P e Zn na folha e no grão influenciado pela fonte e dose de P em solo arenoso.....	64
<b>Tabela 14</b>	Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas do P (g kg <sup>-1</sup> ) e Zn (mg kg <sup>-1</sup> ) na folha (Y), como variável dependente de doses de fosforo aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso.....	65
<b>Tabela 15</b>	Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas do P e Zn no grão (Y), como variável dependente de doses de fosforo aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso.....	66
<b>Tabela 16</b>	Massa seca de parte aérea (MSPA), Número de grãos por vagem (NGV), Número de vagens (NV) e Peso de 100 sementes (P100) influenciado pela fonte e dose de P em solo .....	70
<b>Tabela 17</b>	Massa seca de parte aérea (MSPA), Numero de grãos por vagem (NGV), Numero de vagens (NV) e Peso de 100 sementes (P100) influenciado pela fonte e dose de P em solo arenoso.....	71
<b>Tabela 18</b>	Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas massa seca de parte aérea (MSPA), número de vagens (NV), número de grãos por vagem (NGV) e peso de 100 sementes (P100) (Y), como variável dependente de doses de fósforo aplicadas (X) em solo argiloso e arenoso.....	72
<b>Tabela 19</b>	Índice de Eficiência Agronômica (IEA) e Equivalente Superfosfato Triplo (EqSFT) da soja, e solos com diferentes classes texturais, fontes [fosfato reativo natural da Argélia (FNRAr), Supraphos e Fosfato natural de Alvorada (FNAI)] e doses de P.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
RNA	Ácido Ribonucleico
MAP	Fosfato Monoamônico
DAP	Fosfato Diamônico
CNA	Citrato Neutro de Amônio
FNR	Fosfato Natural Reativo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
SEAB	Secretaria de Agricultura e Abastecimento
P	Fósforo
$\text{PO}_4^{3-}$	Fosfato
$\text{HPO}_4^{2-}$	Hidrogenofosfato
$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	Dihidrogenofosfato
$\text{P}_2\text{O}_4^{3-}$	Tetróxido de Difósforo
ATP	Adenosina Trifosfato
$\text{P}_2\text{O}_5$	Pentóxido de difósforo
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido de ferro
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Óxido de alumínio
RF	Rochas Fósfáticas
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
SFT	Super Fosfato Triplo
USA	Estados Unidos da América
PN	Poder de Neutralização
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total
MSPA	Massa Seca de Parte Aérea
PG	Produtividade de Grãos
IEA	Índice de Eficiência Agronômica
EqSFT	Equivalente de Super Fosfato Triplo
PHTs	Transportadores de fosfato
PVAe	Argisolo Vermelho Amarelo eutrófico
RQd	Neossolo Quartzarenico distrófico
pH	Potencial Hidrogeniônico

Pi	Fósforo inorgânico
Po	Fósforo orgânico
ATP	Adenosina trifofosfato
CTC	Capacidade de troca de cátions
FNAI	Fosfato natural de Alvorada
FNRAr	Fosfato natural reativo da Argélia

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
2.1. A CULTURA DA SOJA .....	19
2.2. FÓSFORO NO SOLO .....	20
2.3. FÓSFORO NOS SOLOS BRASILEIROS .....	25
2.4. FÓSFORO NAS PLANTAS.....	27
2.5. FONTES DE FÓSFORO.....	32
2.6. EXTRATORES DE FÓSFORO .....	36
2.7. ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	39
<b>3. HIPÓTESES E OBJETIVOS .....</b>	<b>41</b>
3.1. HIPÓTESES.....	41
3.2. OBJETIVO .....	41
3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	41
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
5.1. ANALISE DO SOLO .....	49
5.1.1 FÓSFORO NO SOLO .....	49
5.1.1.1. EXTRATOR MEHLICH1.....	53
5.1.1.2. EXTRATOR RESINA .....	54
5.1.2. pH .....	55
5.1.3. CÁLCIO.....	56
5.1.4. ZINCO.....	56
5.2. CORRELAÇÃO DOS EXTRATORES MEHLICH1 E RESINA .....	57
5.3. FÓSFORO E ZINCO NA FOLHA E NO GRÃO .....	59
5.3.1. FÓSFORO NA FOLHA .....	59
5.3.2. ZINCO NA FOLHA.....	60

5.3.3. FÓSFORO NOS GRÃOS.....	61
5.3.4 ZINCO NOS GRÃOS .....	62
5.4. COMPONENTES DE PRODUÇÃO [PESO DE GRÃOS (PG), MASSA SECA DE PARTE AÉREA (MSPA), NÚMERO DE VAGENS (NV), NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM (NGV) E PESO DE 100 SEMENTES (P100)] .....	67
5.5. ÍNDICE DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E EQUIVALENTE SUPERFOSFATO TRIPLO .....	74
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>78</b>
<b>7. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da agricultura moderna, é garantir a segurança alimentar, considerando o crescimento populacional nas últimas décadas, principalmente em áreas urbanas, o que demanda cada vez mais alimentos e consequentemente, sua maior produção. De acordo com as previsões em 2030 será necessário produzir alimentos para aproximadamente 8 bilhões de habitantes (FAO, 2018). O aumento de produção está associado ao aumento de produtividade, que depende entre outros fatores da disponibilidade de nutrientes adequada para cada cultura.

Dentre as culturas de interesse comercial, a soja é a mais produzida, com grande importância econômica no agronegócio brasileiro. O Brasil, na safra 2019-2020, se tornou o maior produtor mundial do grão, ainda com potencial para aumento de produtividade e para a expansão agrícola (CONAB, 2019). A fertilização e o uso eficiente da terra assumem lugar de destaque, pois são responsáveis por ganhos de produtividade das culturas, bem como, o manejo das práticas agrícolas deve ser o mais correto possível, sempre buscando a máxima eficiência e bons retornos sobre os investimentos dispensados.

O desafio de aumentar a produtividade, sem aumentar as áreas de cultivo, depende da evolução das tecnologias empregadas, como exemplo o manejo adequado de fertilizantes e corretivos. A adubação é utilizada com o objetivo de garantir elevados rendimentos de produtividade e fornecer nutrientes para as plantas (MALAVOLTA, 2006). O fósforo (P) é um nutriente crítico, e a quantidade exigida pelas culturas está aumentando devido à busca por altas produtividades. Além disso, é de conhecimento que não há elementos para substituir as funções vitais do P nos organismos vivos, nem seu papel no cenário da segurança alimentar (PANTANO *et al.*, 2016).

Dentre todos os nutrientes essenciais para o desenvolvimento, crescimento e produtividade das culturas, o P é um nutriente fundamental para a eficiência produtiva, e tem uma importante função como constituinte de compostos armazenadores de energia. Grandes quantidades de fosfatos devem ser aplicadas para prevenir a deficiência desse nutriente, pelo fato de que o solo tem a capacidade de reter o elemento em poucas formas solúveis, o que depende dos teores de sesquióxidos, argilas e do pH do solo (HAVLIN; TISDALE; NELSON; BEATON, 2013). Contudo, o uso inadequado do P pode afetar a sustentabilidade agrícola e

tem importantes consequências ambientais, pois, a perda por erosão pode causar a eutrofização de águas superficiais.

As fontes de P utilizadas na adubação se diferenciam pelo grau de solubilidade e quantidade de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) em: fosfatos naturais com baixa, média e alta reatividade, superfosfatos simples e triplo (monocálcicos), fosfatos monoamônico (MAP) e diamônico (DAP). Os superfosfatos, o MAP e o DAP são mais solúveis em citrato neutro de amônio (CNA), se dissolvem rapidamente no solo quando comparados com fosfatos naturais e são considerados produtos de elevada eficiência agronômica (EA), com maior resposta biológica a curto prazo, mas possuem um elevado custo devido sua industrialização. Por outro lado, os fosfatos naturais têm apresentado menor custo, em razão do seu beneficiamento mais simplificado em relação às fontes aciduladas (MELAMED; GASPAR; MIEKELEY, 2009), e além disso, podem disponibilizar o P de maneira mais gradual no solo, reduzindo as perdas desse elemento pelas reações de adsorção ou fixação no solo (RESENDE *et al.*, 2006).

A avaliação da EA de uma fonte de P demonstra a sua eficiência em fornecer nutriente para as plantas, ou seja, a capacidade de rendimento por unidade de P aplicado (GOEDERT; SOUSA, 1984). O efeito dos fertilizantes fosfatos é dependente de fatores como: a) tipo de manejo, b) fatores pedológicos, c) climáticos e d) interação solo-planta, sendo que a EA dos fosfatos sempre é calculada em comparação a uma fonte solúvel de referência, como os superfosfatos simples e triplo (VAN RAIJ, 1986).

A EA no uso adequado dos fosfatos tem sido um desafio no manejo de solos no Brasil. A limitação da fertilidade do solos em regiões tropicais é fortemente afetada pela deficiência do P, sendo que, boa parte da adubação fosfatada fica indisponível à planta, devido ao fenômeno da fixação do P em reação com componentes do solo, isso faz com que grandes quantidades de fosfatos sejam necessárias para disponibilização do elemento para as plantas dentro do ciclo de cultivo (RESENDE; FURTINI NETO, 2007).

É importante estudar outras fontes fosfatadas como alternativas de menor custo e maior poder residual, porque elas são fundamentais para tornar a adubação fosfatada mais viável, principalmente para produtores mais descapitalizados ou com menor poder aquisitivo. É possível melhorar o uso e a eficácia do fertilizante P por meio da implementação das melhores práticas de manejo de fertilizantes como

aplicação da fonte correta, aplicada na taxa certa, no momento certo e no lugar certo (ROBERTS; JOHNSTON, 2015). Aplicação adequada de fontes e doses de P é uma estratégia para melhorar a eficiência do uso do nutriente pelas plantas anuais cultivadas nos solos tropicais (FAGERIA; MOREIRA; CASTRO, 2011).

Considerando esse panorama, foram formuladas as seguintes hipóteses para este estudo: Solos com menor teor de argila podem proporcionar maior aproveitamento do P pela soja, quando são utilizadas fontes de alta reatividade. Fosfatos acidulados são mais eficientes do que os naturais, tanto em solos argilosos como em solos arenosos. A aplicação de doses maiores de P independente da fonte beneficia o aumento dos componentes de produtividade.

O objetivo principal do trabalho foi avaliar a eficiência agronômica de fontes e doses de P no cultivo da soja, em solos com diferentes teores de argila e os componentes de produção que interagem para a máxima produção estimada.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. CULTURA DA SOJA

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*) é uma cultura de grande importância no mundo e apresenta alto potencial produtivo, cuja composição química e valor nutritivo tem importância social e econômica. O cultivo da soja tem crescido nos últimos anos, principalmente pela grande diversidade de seu uso e pelo aumento do consumo global de alimentos, devido à crescente demanda da população e até garantir uma dieta mais rica com base em derivados de origem animal (carne, leite, etc.), que demandam proteína vegetal para sua dieta (PANTANO *et al.*, 2016).

A área plantada com soja no mundo é de aproximadamente 125 milhões de hectares para uma produção mundial de 348 milhões de toneladas (FAO, 2018). No Brasil, essa cultura é de extrema importância, devido ao país ser o maior exportador e ter a segunda maior área de cultivo do mundo (FAO, 2018). A produção no Brasil veio crescendo até chegar na última safra como o maior produtor mundial (CONAB, 2019). Condições favoráveis de clima, tecnologias avançadas para produção de grãos e cultivares adaptadas para plantio de norte a sul do país são fatores que atuam neste cenário (PÍPOLO *et al.*, 2015).

A cadeia da soja é composta pelos grãos e seus derivados, principalmente o farelo e o óleo de soja. Em 2019 a soja foi o principal produto de toda a exportação brasileira com 17,0% (CONAB, 2019). O Brasil cultivou 36,8 milhões de hectares e produziu 120,4 milhões de toneladas na safra 2019-2020, produtividade média de 53 sc/ha (CONAB, 2019). No Estado do Paraná, a produção de soja nesta safra foi de 20,7 milhões de toneladas para uma área de 5,5 milhões de hectares, o que representou 16% da produção nacional, sendo o segundo maior produtor do país, o que demonstra a relevância dessa cultura para o estado (CONAB, 2019).

A soja possui grande capacidade de produção de proteínas e óleo, e dela podem ser extraídos diferentes produtos para alimentação de humanos e animais. A produção no Brasil tem a maior parte seu destino para exportação em forma de grãos, outra parte é esmagada para produção e óleo e farelo. A produção não se concentra somente em grãos, mas tem outros elos, envolvendo transporte, beneficiamento, indústria de esmagamento, cooperativas e trades. Tudo isso incrementa valor aos produtos, garantindo geração de renda para os produtores,

benefício econômico para as empresas e todos os agentes envolvidos na cadeia produtiva, aumentando as receitas cambiais do país (LEMOS *et al.*, 2017). O cultivo desta leguminosa é responsável por mais de quatro milhões de empregos diretos e indiretos e o mercado altamente competitivo também obriga o agricultor brasileiro a buscar cada vez mais o aumento da produtividade e redução de custos de produção (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Em decorrência do desenvolvimento tecnológico, cultivares altamente produtivas, resistentes as várias doenças e com capacidade de adaptação a diversas regiões, o cultivo tem se expandido por todo o território nacional (FREITAS, 2011). Porém, o Brasil possui solos ácidos e de baixa fertilidade, que necessitam de manejo adequado da adubação e nutrição para atender as necessidades da cultura de forma equilibrada, pois, grande parte dos nutrientes é aplicada no momento do plantio (LANA; LUCHESE; BRACCINI, 2010).

A introdução de novas cultivares de soja com maior potencial produtivo tem demandado quantidades maiores de nutrientes, pois a produtividade por hectare tem alcançando índices mais elevados chegando a  $5,0 \text{ t ha}^{-1}$  (SEAB, 2017). O potencial produtivo depende muito de fatores genéticos, mas fatores edáficos e climáticos influenciam na produtividade durante o ciclo da cultura, sendo esses, limitantes para que esse potencial produtivo seja alcançado. Devido a isso, estudos de diferentes fontes de nutrientes são de extrema importância para a produtividade dessa cultura (SANTOS *et al.*, 2012).

## 2.2. FÓSFORO NO SOLO

A necessidade de aumentar a produtividade das culturas comerciais para atender à demanda crescente de alimentos, levou à necessidade de aumentar a quantidade de nutrientes nos cultivos. Com o aumento da produtividade as culturas que antes extraíam o P apenas do que já estava presente no solo ou do esterco aplicado, passaram a depender de fertilizantes provenientes principalmente de rochas fosfáticas. No entanto, trata-se ainda de um recurso não renovável, que levou de 10 a 15 milhões de anos para sua formação (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). A partir de 2009, o total de reservas de rocha fosfática extraível foi estimado em 15 a 16 bilhões de toneladas, contendo aproximadamente 30% de fósforo inorgânico (Pi) (NUSSAUME *et al.*, 2011).

O P é considerado o 11º elemento mais abundante na crosta terrestre, porém sua disponibilidade para as plantas geralmente é baixa (RICHARDSON, 1994). A sua concentração na solução do solo raramente excede a 10 µM (BIELESKI, 1973), além disso, apresenta uma difusão lenta e alta adsorção em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) em solos ácidos e intemperizados, o que aliado às quantidades exigidas pelos tecidos vegetais para desempenhar funções metabólicas vitais, faz com que a fertilização com P seja um dos principais meios para o aumento da produção na agricultura (ROTTERDAM *et al.*, 2012).

A disponibilidade do P no solo através das formas orgânica (Po) ou inorgânica (Pi), são importantes fontes para o crescimento das plantas, essa disponibilização é controlada pelas características do solo e condições ambientais que interferem diretamente na taxa de mineralização da fração orgânica, realizada por microrganismos e podendo imobilizar ou liberar os íons fosfatos para solução do solo (DOS SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008)

A distribuição do P é irregular na maioria dos solos (RICHARDSON, 1994) e pode estar tanto na forma orgânica ou como na inorgânica (TUNER; RICHARDSON; MULLANEY, 2007). O P inorgânico (Pi) contido em minerais primários provenientes da rocha original (apatitas ou fosforitas), apresenta-se muito estável quanto à sua solubilidade. Quando presente em minerais secundários, principalmente fosfatos de cálcio, ferro e alumínio, as taxas de dissolução variam em função do pH e tamanho das partículas (OELKERS; VALSMI-JONES, 2008).

No solo, os fosfatos orgânicos podem estar em formas estabilizadas como o fosfato de inositol e fosfonatos, e formas mais reativas como ortofosfato de monoésteres e diésteres e polifosfatos orgânicos (CONDRON; GOH; NEWMAN, 1985). Em geral, 35% a 70% do total do P presente no solo encontra-se na forma inorgânica, enquanto entre 30% a 65% na forma orgânica (SHEN *et al.*, 2011). Do total de Po 1% a 10% está contido na biomassa microbiana, que constitui uma reserva de certa relevância devido sua alta taxa de renovação e por evitar que ocorra a fixação em formas minerais pouco solúveis (RICHARDSON, 2001).

O Po pode ser liberado através de processos de mineralização mediado por organismos do solo e raízes das plantas, associadas com a secreção de fosfatases. Tais processos são altamente influenciados pela umidade, pH, temperatura e propriedades físico-químicas das superfícies das partículas que formam o solo (TUNER; RICHARDSON; MULLANEY, 2007).

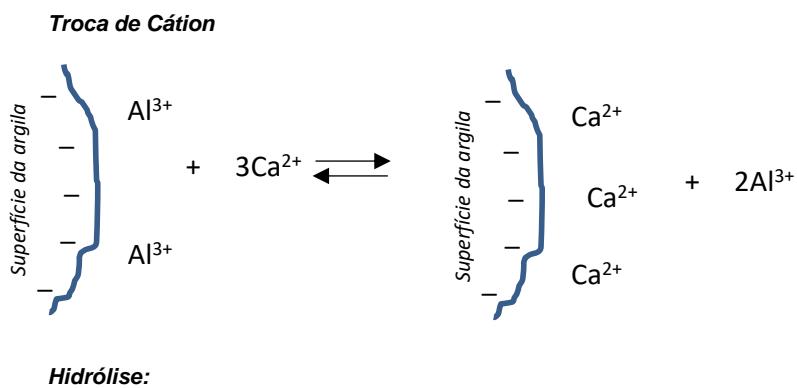
Sistemas de produção envolvendo práticas de manejo como rotação de cultura, sistema plantio direto (SPD) e integração lavoura pecuária (ILP), auxiliam na dinâmica, disponibilidade e liberação do P aplicado no solo, quando comparado a sistemas convencionais de manejo (FRANCHINI *et al.*, 2010). Nesses sistemas se destacam as formas orgânicas do P que são rapidamente aproveitáveis pelas culturas (RESENDE; FURTINI NETO, 2007), como verificado com a braquiária; uma gramínea que possui alta eficiência na absorção de P e melhor aproveitamento de fontes pouco solúveis (SOUSA *et al.*, 2016). Sistemas que utilizam braquiárias e outras gramíneas com o mínimo revolvimento do solo, proporcionam condições para que o P aplicado nas adubações seja convertido em formas orgânicas prontamente disponível para as plantas (FRANCHINI *et al.*, 2010).

O P presente na solução do solo reage com seus constituintes, gerando formas menos solúveis e pode ser removido da fase solúvel passando a ser chamado de retido ou adsorvido. Assim as reações de sorção/dessorção, precipitação/dissolução e imobilização/mineralização estão envolvidas nos processos de retenção do P, e portanto, na sua disponibilidade para as plantas. A retenção do P no solo pode ocorrer por vários processos que sofrem a influência da natureza e quantidade dos componentes do solo, pH, outros íons, cinética e saturação dos complexos de sorção (NOVAIS; SMYTH, 1999 e HAVLIN *et al.*, 2005). O solo tem capacidade de adsorver o P em média, 1.000 vezes mais que a adubação fosfatada aplicada, isso implica, em uma tendência à deficiência de P em condições naturais (VILAR; VILAR, 2013).

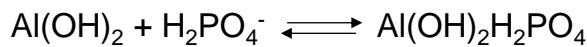
A fixação de P envolve mecanismos de adsorção, onde ligações eletrostáticas ou covalentes e de precipitação, formam compostos insolúveis tornando o elemento indisponível para as plantas. Adsorção, são as reações químicas e físicas que ocorrem nas interfaces dos minerais do solo, como por exemplo óxidos de alumínio e ferro que adsorvem os íons fosfato (ALCARDE; GUIDOLIN; LOPES, 1998).

A capacidade de adsorção do solo depende da quantidade de constituintes com capacidade de sorver moléculas neutras ou carregadas eletricamente, como nos solos tropicais onde a presença de óxidos e hidróxidos de Fe e Al ocorrem como partículas recobrindo as argilas. O P é mais retido por argilas tipo 1:1 (caulinita) do que por tipo 2:1 (vermiculitas e montmorilonitas), assim, em solos mais intemperizados haverá maior fixação do P (HAVLIN *et al.*, 2005).

A espécie e concentração dos cátions exerce influência na adsorção do P com os divalentes tendo ação mais efetiva do que os monovalentes. Assim, argilas saturadas com cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) podem reter maiores quantidades de P do que as saturadas com sódio ( $\text{Na}^+$ ). A concentração de alumínio trocável também tem papel importante no processo de retenção do P, principalmente quando hidrolisado como demonstra a Figura 1 (HAVLIN *et al.*, 2005).



**Precipitação e/ou Adsorção:**



**Figura 1.** Possível ação da hidrólise de alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) na fixação do fósforo (P)

Adaptado de HAVLIN *et al.*, 2005.

A competição pelos sítios de sorção por ânions, tanto orgânicos como inorgânicos, podem promover a dessorção do P retido, embora nem todos com a mesma intensidade, sendo a força da ligação entre o ânion e a superfície de sorção o determinante da sua habilidade competitiva (SAMPLE; SOPER; RACZ, 1980 e HAVLIN *et al.*, 2005). As reações tenderão mais para dessorção do que adsorção quanto maior for a extensão da saturação do complexo de sorção. Isso ocorre devido ao fato de que em altas saturações o P é retido menos fortemente o que depende da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo. Assim, em condições de baixa saturação grande parte do fertilizante fosfatado aplicado será retido, enquanto em alta saturação o P aplicado estará disponível para a planta (HAVLIN *et al.*, 2005).

A CTC é muito importante, pois, está relacionada com a retenção dos nutrientes para as plantas. Quanto mais intemperizado o solo, menores são os

valores de CTC. A matéria orgânica (MO) exerce um papel preponderante na eficiência dos fertilizantes fosfatados, pois favorecem o aumento da CTC do solo atuando como um dreno de Ca. Outro fator importante na fixação do P é o fator capacidade de P (FCP). Solos com elevada FCP como os mais argilosos tem maior capacidade de fixação do P e necessitam de maiores quantidades de fertilizantes fosfatados (RESENDE; FURTINI NETO, 2007).

As transformações do P no solo dirigem sua passagem por diversos processos que determinam uma dinâmica extremamente complexa, como demonstrada na figura 2, com grande influência na sua disponibilidade para as plantas (SHEN *et al.*, 2011). Nesse contexto a rizosfera é uma zona crítica onde a interação entre plantas, solo e microrganismos tem grande interferência nessa dinâmica.

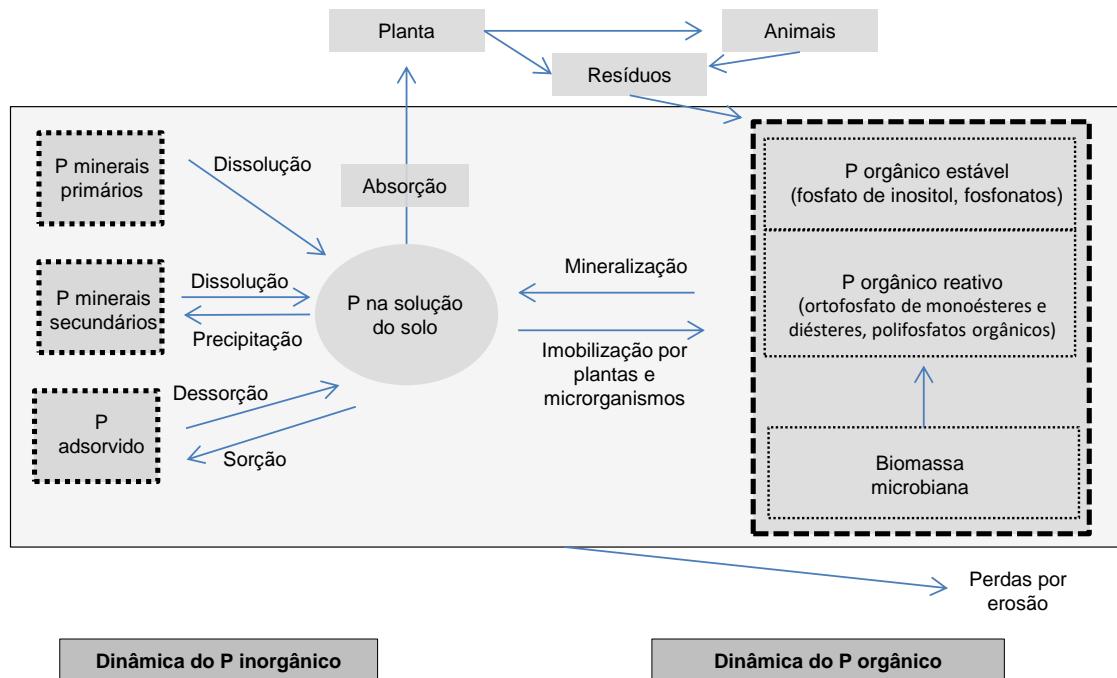


Figura 2. Dinâmica do fósforo no solo (modificado de HAVLIN *et al.*, 2005).

As raízes modificam o ambiente na rizosfera pela exsudação de compostos como ácidos orgânicos e fosfatases que promovem a solubilização do P, facilitando sua absorção pelas plantas (ZHANG *et al.*, 2014). Devido à baixa mobilidade do P (coeficiente de difusão de  $10^{-12}$  a  $10^{-15} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ) uma área de esgotamento é gerada em decorrência da sua absorção pelas raízes o que resulta em um gradiente de concentração em uma direção radial a partir da superfície destas (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998). Assim, o P solúvel deve ser reposto de 20 a 50 vezes por dia

para garantir um fornecimento adequado de acordo com as quantidades requeridas pela planta (MARSCHNER, 2012).

As características peculiares ao P como a baixa mobilidade, alta fixação e ainda as quantidades exigidas pelos tecidos vegetais para a manutenção da viabilidade celular têm levado ao aumento do uso de fertilizantes fosfatados de alta solubilidade, aumentando sua concentração no solo (SHEN *et al.*, 2011). Porém, o P interage com os micronutrientes manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn) e ferro (Fe), formando complexos insolúveis. Portanto, a excessiva elevação da disponibilidade de P pela aplicação de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados pode reduzir a absorção destes micronutrientes, afetando o metabolismo vegetal com reflexos negativos no desempenho produtivo das culturas (PEDAS *et al.*, 2011; BOUAIN *et al.*, 2014 e DAI *et al.*, 2016).

### **2.3. FÓSFORO NOS SOLOS BRASILEIROS**

O P é considerado um nutriente de baixo aproveitamento pelas plantas, principalmente em solos tropicais e ácidos, sendo comum observar que mais de 70% do P aplicado como fertilizante pode não estar prontamente disponível para as plantas (BENTO *et al.*, 2015). Essa diferença em relação a outros nutrientes está relacionada principalmente a sua “fixação” ou “adsorção”, nos solos com alto grau de intemperismo e com elevados teores de óxidos de ferro ( $Fe_2O_3$ ) e alumínio ( $Al_2O_3$ ). Os solos com essas características, normalmente possuem baixos teores de P disponível para as plantas, e a capacidade de fixação e/ou adsorção, pode ser ainda maior dependendo do teor de argila

Os solos tropicais como do Brasil, são caracterizados pelos baixos teores de P na forma disponível as plantas, devido ao elevado grau de intemperismo, o que leva à formação de um número reduzido de minerais (ROCHA *et al.*, 2005). Nesses solos o P é um nutriente que limita a produção agrícola e restringe o crescimento das plantas (MACHADO; SOUZA, 2012).

Conforme estudo de Malavolta (1980) cerca de 90% das análises feitas no país mostram que os teores de fósforo disponível no solo são comumente baixos, podendo ser inferiores a  $1,0\text{ mg dm}^{-3}$ . Já os teores totais de P nos nossos solos, são os que aparecem na Tabela 1, onde se observa que o limite inferior é  $40\text{ mg dm}^{-3}$  e

o superior é 2.130 mg dm<sup>-3</sup>, sendo mais frequente os teores menores do que 430 mg dm<sup>-3</sup> (MALAVOLTA, 1976).

**Tabela 1.** Teores totais de fósforo no solo do Brasil

<b>Solo</b>	<b>mg dm<sup>-3</sup></b>
Neossolos Quartezarênicos	40 - 90
Latossolos	130 - 652
Espodossolos	87
Argissolos	43 - 69
Organonossolos	2.130
Nitossolos vermelhos	610 – 1.690

Adaptado de MALAVOLTA, 1976.

Dependendo do pH vários tipos de ânions de P podem existir (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) com predominância do dihidrogênio fosfato (H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>) na faixa situada entre pH 5 e 6,5, que compreende a de maior disponibilidade do nutriente (NUSSAUME *et al.*, 2011). Em solos ácidos o P é adsorvido por óxidos e hidróxidos de Fe e Al, já em solos neutros a retenção de P ocorre principalmente por reações de precipitação (HAVLIN *et al.*, 2005). Entre os óxidos e hidróxidos de Fe presentes na fração argila derivada de rochas vulcânicas, a goethita-Gt ( $\alpha$ FeOOH) e a hematita-Hm ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) são os mais abundantes, em termos quantitativos (SOUZA JUNIOR *et al.*, 2010).

Os fosfatos de Fe são as formas predominantes no solo do Brasil, estes e os de Al são os mais comuns conforme apresentado na Tabela 2 (MALAVOLTA, 1985). Os solos cultivados, em sua maioria possuem o pH na faixa de 4 a 5 e, consequentemente, quase todo o P na solução está na forma de íons H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> (HAVLIN *et al.*, 2005).

**Tabela 2.** Formas de P nos solos

Forma	% de P total <sup>(1)</sup>
<b>Orgânicas</b>	
<b>Fosfato inositol</b>	10 - 50
<b>Ácidos nucleicos</b>	0,2 - 2,5
<b>Fosfolipídios</b>	1 - 5
<b>Outras</b>	10 - 50
<b>Minerais</b>	
<b>P-Ca</b>	5 - 30
<b>P-Fe</b>	10 - 20
<b>P-Al</b>	<10
<b>P-Adsorvido</b>	1
<b>P-Ocluso</b>	40 - 90

1 – Total = 0,005 – 0,20% = 110 – 4400 kg ha<sup>-1</sup>

Adaptado de MALAVOLTA, 1985.

Na solução do solo as formas de P encontradas dependem de formação de complexos e reações de protonação, enquanto a dissolução e o equilíbrio entre essas, são produto da solubilidade e da absorção das raízes (LARSEN, 1967). Os altos níveis de absorção de P pela raiz da planta fazem com que o equilíbrio se desloque para a direita [P (não lábil) → P (lábil) → P (solução) → P (raiz)]; isto é, parte do P (não lábil) se torna disponível. Mesmo em solos pobres as formas não lábeis de P são grandes em relação ao P-lábil mais o P-solução. É possível então, manter na solução do solo uma concentração baixa de P (MOREIRA; MALAVOLTA; MORAES, 2002).

As variações nas quantidades de fósforo total dos solos das regiões tropicais ocorrem principalmente devido ao material de origem, o processo de gênese e condições climáticas (GATIBONI, 2003). No Brasil, o P total encontra-se na maior parte como P não lábil; devido a isso, solos com 200 ou 300 mg dm<sup>-3</sup> de P-total podem ser extremamente deficientes para as culturas (GOEDERT; REIN; SOUSA, 1986).

#### 2.4. FÓSFORO NAS PLANTAS

Em solos tropicais que apresentam baixo teor de P disponível e predominância de acidez, este é o nutriente que se constitui como mais limitante para as culturas agrícolas (DE ARAUJO, 2011). A baixa disponibilidade de fósforo no solo exige um

mecanismo de absorção muito eficiente das plantas, que através das raízes são capazes de absorver fosfato da solução do solo (ASHER; LONERAGAN, 1967).

As plantas absorvem P preferencialmente como íons ortofosfato primário ( $H_2PO_4^-$ ) e secundário ( $HPO_4^{2-}$ ) e a predominância de um deles na solução do solo depende, principalmente, do pH, sendo que em pH 7,2 apresentam-se em quantidades iguais. Abaixo do pH 7,2 condição da maioria dos solos agricultáveis, o  $H_2PO_4^-$  torna-se a forma dominante e comparado ao íon secundário, sua absorção pelas plantas é mais rápida independente da sua concentração (MARSCHNER, 2012).

Nos tecidos vegetais a concentração de P está na ordem de 20  $\mu M$  o que é bem maior do que a sua concentração na solução do solo, geralmente abaixo de 10  $\mu M$ . Portanto, as plantas desenvolveram um sistema de transporte ativo de alta afinidade do tipo simporte  $Pi/H^+$  contra um gradiente de concentração que é realizado por proteínas codificadas por genes que pertencem à família *PHT1* (*phosphate transporters - PHT*), cuja inibição da expressão resulta em significante redução da absorção de Pi pelas raízes (SHIN *et al.*, 2004).

As proteínas transportadoras de fosfato facilitam a absorção do P a partir da solução do solo assim como a translocação entre os tecidos vegetais, essas estão agrupadas em quatro famílias, PHT1, PHT2, PHT3 e PHT4. A localização de maior expressão de cada uma dessas famílias está estreitamente relacionada ao seu desempenho. Assim, membros da família PHT1, geralmente localizados na membrana plasmática (NUSSAUME, *et al.*, 2011), estão associados à absorção, distribuição e remobilização (BAKER *et al.*, 2015). Já os membros das demais famílias estão envolvidos na distribuição intracelular do Pi como sugere sua localização, PHT2 nos cloroplastos (VERSAW; HARRISON, 2002), PHT3 na mitocôndria (RAUSCH; BUCHER, 2002) e PHT4 nos plastídeos e aparelho de Golgi (GUO *et al.*, 2008).

Os adubos fosfatados podem ser absorvidos por difusão ou fluxo de massa. No fluxo de massa há o escoamento de um soluto juntamente com a água do solo, sendo importante onde os teores de fósforo na solução do solo são altos (RUIZ; MIRANDA; CONCEIÇÃO, 1999). O P chega a superfície das raízes de acordo com a concentração presente na solução do solo e com a quantidade de água absorvida pelas plantas (BARBER, 1962). A maior quantidade de P absorvida pela planta é realizada por difusão. No processo de solubilização os fertilizantes granulados

absorvem água, onde ocorrem reações entre os íons dissolvidos no solo; e a solução formada possui alta concentração de P movendo-se para fora do grânulo, e simultaneamente há a difusão de sais em sentido oposto aos grânulos e da água do solo em direção aos grânulos (PROCHNOW; CASARIN; CUNHA, 2010).

Depois de absorvido pelas raízes o fosfato não é reduzido e permanece em sua forma oxidada, podendo continuar como fosfato inorgânico ou ser imediatamente incorporado em compostos orgânicos através da formação de éster fosfato simples (C-O-P), como nos açúcares fosfatados, ou em associação com outro fosfato pela ligação pirofosfato rica em energia como na adenosina trifosfato (ATP). Já as moléculas complexas podem apresentar ligações diéster carbono-fósforo-carbono (C-P-C) conectando grupos de unidades. As trocas entre Pi e P em ligações éster ou pirofosfato são muito rápidas e para ser liberado no xilema onde é levado para a parte aérea o P orgânico retorna ao seu estado inorgânico (MARSCHNER, 2012).

Na planta, o P desempenha várias funções fundamentais para a manutenção da viabilidade celular, faz parte da estrutura de macromoléculas vitais como os ácidos nucleicos DNA e RNA, formando pontes entre as unidades dos ribonucleosídeos que os compõem (MARSCHNER, 2012). O P é responsável pela natureza ácida e consequente alta concentração de cátions nessas macromoléculas. Na planta, a proporção de P presente nos ácidos nucleicos em relação a outras moléculas orgânicas está relacionada à atividade metabólica do tecido, sendo maior em folhas em expansão, com alta síntese de proteínas e outros compostos, e reduzida em maduras e senescentes (SUZUKI; MAKINO; MAE, 2001).

Outras moléculas que apresentam P na sua composição são os fosfolipídeos das membranas e nucleotídeos utilizados no metabolismo energético como o ATP (MARSCHNER, 2012). O P concentra-se nas áreas mais ativas do crescimento, participa de vários processos metabólicos e é fundamental para o armazenamento e fornecimento de energia. Os primeiros compostos orgânicos formados com o fósforo dentro da planta são as fosfohexoses e o difosfato de uridina, que são os percursores do ATP (MALAVOLTA, 1980).

As ligações ricas em energia de éster fosfato e entre fosfatos, predominantemente na forma de ATP, suprem as necessidades do organismo nos processos que dependem de energia como é o caso da absorção de íons contra um gradiente de concentração. A transferência do grupo fosforila do ATP para outros

compostos, denominada de fosforilação, resulta na ativação do composto que o recebe o que pode desencadear a biossíntese de outros metabólitos. É o que ocorre na biossíntese do amido, macromolécula que armazena a energia de forma estável na planta, que inicialmente necessita da ativação da glicose por meio de fosforilação (MARSCHNER, 2012).

Nas biomembranas a porção fosfato forma a região hidrofílica com interação com os íons no meio circundante e, sob deficiência do nutriente, a planta pode substituir os fosfolipídeos por galactolipídeos (GAUDE *et al.*, 2008) ou sulfolipídeos (BYRNE; STONE; MILLAR, 2011).

Em diversos processos metabólicos como a fotossíntese, respiração oxidativa, e assimilação de nitrogênio o P tem função de regulação, não apenas pela transferência de energia requerida por tais processos, mas também por meio da fosforilação de enzimas, alterando as suas propriedades alostéricas, o que leva à ativação ou inativação das mesmas (SHEN *et al.*, 2009). Além disso, o P participa em processos de sinalização pela ação de moléculas sinalizadoras derivadas de fosfolipídeos como o fosfatidilinositol e o inositol trifosfato (XUE; CHEN; LI, 2007).

A fosforilação de compostos intermediários, regulação de enzimas e o controle das trocas de trioses fosfato (produto da fotossíntese) e Pi entre cloroplasto e citosol, mediada por transportadores de fosfato, são alguns dos aspectos relacionados à fotossíntese que são influenciados pela concentração de P, esta necessita ser mantida dentro dos limites adequados para o funcionamento satisfatório desse processo essencial para o desenvolvimento e produção da planta (HELDT *et al.*, 1991).

No caso de leguminosas que realizam a fixação biológica do nitrogênio (FBN) o P é demandado em várias etapas do processo, iniciando na sinalização entre a bactéria simbionte e a planta através da fosforilação de receptores (O'HARA, 2001). A formação do nódulo demanda a síntese de compostos ricos em P como ácidos nucleicos, proteínas e fosfolipídeos de membrana, o que colabora para que este tecido seja um forte dreno para o nutriente (VAUCLARE *et al.*, 2013). Além disso, as reações da redução do nitrogênio atmosférico ( $N_2$ ) a amônia ( $NH_3$ ) por meio da enzima bacteriana nitrogenase utilizam grande quantidade de ATP, bem como os subsequentes processos de assimilação dessa amônia em aminoácidos e ureídeos (MARSCHNER, 2012).

A atuação do P na regulação de processos metabólicos requer, portanto, uma fina regulação de sua homeostase e a necessidade de um mecanismo de compartimentação para evitar o seu excesso prejudicial ao bom funcionamento do metabolismo. Em geral, o vacúolo funciona como um armazenador de P não metabólico que é liberado no citosol quando for necessário. Do total de P contido na célula, 85% a 95% encontra-se armazenado no vacúolo na forma de Pi (LAUER; BLEVINS; SIERZPUTOWSKA-GRACZ, 1989). Outras formas que o nutriente é encontrado armazenado na planta são os polifosfatos inorgânicos, sintetizados pelas plantas como polímeros lineares de Pi, e o fitato, que são sais de potássio (K), magnésio (Mg) e cálcio (Ca) do ácido mio-inositol hexafosfato. O fitato é a forma típica de estocar P nos tecidos dos grãos ou outros tipos de sementes e a proporção de K, Mg ou Ca associado varia muito entre as espécies de planta e entre os diferentes tecidos da semente (LOTT *et al.*, 2009).

Embora a disponibilidade do P na solução do solo seja, em geral, baixa e a deficiência nos tecidos vegetais ser mais frequentemente observada, em algumas condições pode ocorrer o seu excesso, principalmente devido a interações com outros elementos como o zinco (Zn) cuja deficiência aumenta a taxa de absorção de P pelas raízes, assim como a sua translocação para a parte aérea devido ao aumento da permeabilidade da membrana plasmática e o impedimento da baixa regulação de transportadores independente da disponibilidade de P. Uma concentração elevada de P na parte aérea, por sua vez, reduz a solubilidade e mobilidade Zn, tanto na célula como no transporte a longa distância (HUANG *et al.*, 2000). A deficiência deste nutriente pode causar efeitos negativos desde os estádios iniciais até o desenvolvimento de frutos e sementes, a falta faz com que ocorra pequeno desenvolvimento de brotações e raízes, consequentemente, haverá menor exploração do solo em busca de água e nutrientes. Também há a redução tanto na expansão foliar como no número de folhas. No entanto a síntese de clorofila é pouco afetada e sua concentração tende a aumentar, resultando em folhas com coloração verde escura (RAO; TERRY, 1989).

Um redirecionamento na distribuição de carboidratos em direção às raízes propicia uma típica redução da relação parte aérea/raízes, além disso, observa-se não apenas uma redução na translocação de P para a parte aérea, mas também uma translocação do nutriente da parte aérea para as raízes (SMITH; JACKSON; BERG, 1990). Em estudos dos efeitos da deficiência de P na arquitetura radicular

observa-se uma redução do crescimento da raiz primária acompanhada de um aumento na densidade das raízes laterais. Nessas condições a redução da raiz primária é atribuída à elevação da concentração do Fe que provoca a formação de radicais hidroxila e consequente morte do meristema apical. Em concentrações elevadas de P também se observa redução da raiz primária, cuja possível explicação seria o reduzido teor de outros nutrientes como Zn, manganês (Mn), Ca e Fe que poderiam estar associados a resposta hormonal, mais especificamente ao etileno (SHUKLA; RINEHART; SAHI, 2017).

Em soja a deficiência de P demonstra sintomas inicialmente em folhas mais velhas e intermediárias, uma cor verde mais escura, com passar do tempo essas folhas mostram clorose generalizada, que vai da ponta para a base e nos estádios de floração e enchimento de grãos fica mais acentuado (ROSOLEM; TAVARES, 2006). As folhas mais velhas apresentam cor amarelada, cor verde azulada e pouco brilho, número deduzido de sementes e atraso no florescimento, bem como tamanho reduzido da planta, mas esses sintomas são difíceis de serem caracterizados em condições de campo (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

## 2.5. FONTES DE FÓSFORO

O fosforo pode ser encontrado na natureza por todo o mundo em jazidas, como fosfatos em rocha (GONÇALVES; FERREIRA; SOUZA, 2008). A rocha fosfática (RF) é a única fonte de fósforo viável e está contida em depósitos de origens sedimentares (em torno de 85% no mundo) e, ígneas (próximo de 15%) (SOUZA; FONSECA, 2009).

O P utilizado na agricultura, proveniente de RF, se constitue num recurso não-renovável e formado basicamente por apatitas e fosforitas. As apatitas são de origem vulcânica extraídas de minas profundas, rochas duras, com alto grau de cristalização e baixa solubilidade em ácido cítrico (AC). As fosforitas podem ser de depósitos metamórficos extraídas de minas superficiais e rochas moles, ou ainda, sedimentares extraídas de minas superficiais litorâneas. Segundo as estimativas, reservas fosfáticas possuem uma vida útil no mundo de 240 anos (USGS, 2019).

A apatita representada pela fórmula  $\text{Ca}_5(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})(\text{PO}_4)_3$  possui teor de 5 a 15% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , encontra-se nas rochas carbonatíticas, é liberado no solo pelo intemperismo físico, químico e biológico ao longo dos anos e disso resultam

materiais mais estáveis que são então incorporados a compostos orgânicos (DOS SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Neste grupo destaca-se a fluorapatita, presente em quase todas as rochas ígneas em concentração que varia de 0,1% a 1%.

A estrutura cristalina da apatita permite a incorporação de quase metade dos elementos da tabela periódica, funcionando como um repositório para elementos menores e traços em rochas (HUGHES; RAKOVAN, 2002). Tecidos duros de muitos organismos apresentam em sua composição os minerais de apatita, como, por exemplo, os ossos de mamíferos que contém de 65% a 70% de hidroxiapatita (TUREK; BUCKWALTER, 1994).

Os depósitos sedimentares extensos que contêm até 80% de apatita, intercalados com calcário, são denominados fosforitas e são comumente explorados como minério de fosfato (TUREK; BUCKWALTER, 1994). Essas fosforitas, são rochas formadas em função do acúmulo e consolidação de materiais degradados de rochas pré-existentes, ou a deposição de restos orgânicos (ossadas, esqueletos de animais), como no fundo de lagunas com águas calmas. A fosforita se constitui num fosfato tricálcio, sendo uma variedade fibrosa da apatita e de origem sedimentar, possui traços de urânio e está geralmente associada a carbonatos de cálcio, magnésio e óxidos de ferro. Ocorre em bandeamentos de folhetos, calcários e arenitos, tem forma amorfa ou criptocristalina e consistência arenosa ou argilosa (SOUZA; FONSECA, 2009).

As RFs em geral são ígneas ou sedimentares (FIXEN, 2009). Rochas ígneas contém baixo teor de apatita como forma de P, mas podem ser beneficiadas, atingindo de 36% a 40% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Cerca de 80% das RFs provém de depósitos de sítios sedimentares, que tipicamente contém flourapatita (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009).

As maiores reservas mundiais estão em países como Marrocos (37%), China (27%), EUA (8%), África do Sul (10%), Jordânia (6%) que detêm 88% das reservas de rochas (FIXEN, 2009). Os três maiores produtores mundiais são EUA, Rússia e Marrocos (IBRAM, 2012).

O Brasil é o sexto maior produtor mundial de fosfato e as maiores jazidas estão concentradas em Minas Gerais (68%), Goiás (14%) e São Paulo (6%) (IBRAM, 2012). Cerca de 80% das jazidas fosfáticas naturais do Brasil são de origem ígnea, apresentam quantidade acentuada de rocha carbonatítica e minerais micáceos, com

baixo teor de  $P_2O_5$  (SOUZA; FONSECA, 2009). O Brasil é o 4º consumidor mundial de fertilizantes, ficando atrás apenas da China, da Índia e dos Estados Unidos (IBRAM, 2012) e grande parte do P utilizado é importado, e os principais fornecedores são: EUA (21%), Marrocos (25%), Rússia (14%), Israel (10%) e China (13%).

As fontes de P são classificados quanto a solubilidade em água, citrato neutro de amônio (CNA) e ácido cítrico (AC) conforme legislação brasileira (SOUZA & LOBATO, 2004). Nos fosfatos com alta solubilidade em água e CNA encontramos o superfosfato triplo (SFT), o superfosfato simples (SS), os fosfatos monoamônico (MAP) e diamônico (DAP).

O SFT e SS são fertilizantes fosfatados totalmente acidulados, obtidos a partir do tratamento ácido de rochas fosfáticas. São uma fonte de alto custo quando comparados a fosfatos naturais, que tem menor custo por unidade de P do que os solúveis (RESENDE et al., 2008). Esses fosfatos juntamente com o DAP e MAP são as fontes mais produzidas no Brasil. Os fosfatos solúveis, quando incorporados ao solo, tem grande capacidade de liberação de P para as plantas, são fertilizantes fosfatados com alta produção por unidade de  $P_2O_5$  total aplicado ao solo, ou seja, de alta eficiência agronômica (GOEDERT, 1983).

No grupo dos fosfatos insolúveis ou pouco solúveis em água e em AC, temos os fosfatos naturais brasileiros (Alvorada, Araxá, Patos de Minas, Catalão e outros). Os insolúveis em água, mas alta solubilidade em CNA ou AC temos os grupo dos termofosfatos e produtos à base de fosfato de cálcio. Enfim, os insolúveis em água e com média ou alta solubilidade em AC são os fosfatos naturais sedimentares de alta reatividade (Carolina do Norte, Gafsa, Argélia e outros).

As fontes solúveis em água quando adicionadas ao solo, aumentam rapidamente a concentração do P na solução do solo. Esses fosfatos solúveis têm sua eficiência diminuída ao longo do tempo devido ao processo de “adsorção” ou “fixação”. Já os fosfatos naturais, que são insolúveis em água, se dissolvem lentamente na solução do solo e tendem a aumentar a disponibilidade do P para as plantas com o tempo (BARRETO et al., 2007).

No Brasil o uso de fosfatos reativos ou solúveis em água, é de especial importância, considerando que os solos brasileiros contem baixos teores de P disponível (van RAIJ, 1991). Esses adubos fosfatados além do efeito imediato sobre a cultura, podem ter efeito residual nas culturas em sequência. Vários fatores podem

afetar o efeito residual do fosforo como: o tipo da cultura, doses de P, fontes de P, método de aplicação tipo de solo, umidade e manejo de solo. Já os fosfatos naturais apresentam solubilidade mais lenta, e um potencial efeito residual compensatório, quando comparado com os fosfatos solúveis; devido a isso, pode ocorrer um aumento gradual de sua disponibilidade (MOREIRA; MALAVOLTA; MORAES, 2002).

As rochas de origem sedimentar conforme o grau de substituição isomórfica podem ou não ser reativas. Sendo assim essas rochas podem ser classificadas como de muita baixa, baixa, média ou alta reatividade. As rochas de alta eficiência são provenientes da Argélia (Djebel-Onk), Tunísia (Gafsa), Israel (Arad), Peru (Bayovar) e USA (Carolina do Norte). Já rochas dos USA (Tenesse, Florida), Colômbia (Pesca e Hulia) são de media eficiência.

Os fosfatos naturais do Brasil de origem metamórfica como os de Registro/SP, Alvorada/SP e Arrais/TO, tem média reatividade no solo. Já os fosfatos naturais do grupo das apatitas, normalmente não reativos e considerados de baixa eficiência, como os de Tapira/MG, Araxá/MG, Jacupiranga/SP e Catalão/GO, Registro/SP, esses necessitam de pH em torno de 5,4 para serem disponibilizados (BRAGA; PROCHONOW, 2006). Esses fosfatos de lenta solubilização, apresentam resultados de menor eficiência a curto prazo em adubação de recuperação ou melhoramento do solo, porém, em longo prazo seu efeito residual é geralmente maior (GOEDERT, 1983).

Trabalhos demonstram que os fosfatos naturais, quanto menor o tamanho da partícula e maior o contato com o solo, maior será a liberação de fósforo (van RAIJ, 1991). O fosfato natural de Gafsa, moído até que 85% de suas partículas ficassem menores do que 0,074 mm, apresentaram resultados próximos ao superfosfato triplo granulado (GOEDERT; LOBATO, 1984). Korndörfer *et al.*, (1999) também demonstrou que os fosfatos naturais Arad, Marrocos e Gafsa farelados apresentaram resultados similares ao superfosfato triplo granulado. Os fosfatos naturais tem sido usados como alternativas de menor custo, consequentemente o consumo de fontes de fósforo de baixa solubilidade como os fosfatos naturais reativos, tem aumentado (OLIVEIRA *et al.*, 2015). O Brasil dispõe de grandes jazidas de fosfato natural, em diversas regiões do pais, tornando viável o uso destas fontes com baixo custo (ONO *et al.*, 2009).

## 2.6. EXTRATORES DE FÓSFORO

A análise de solo é de extrema importância, pois os resultados gerados são critérios para as recomendações de quantidades de adubos a serem aplicados do solo, a fim de garantir que a correção e adubação sejam realizadas de forma mais assertiva (SILVA; van RAIJ, 1999).

A disponibilização de P no solo considera dois fatores que estão interligados: O “fator intensidade” (I) que considera o P da solução do solo (fase lábil), e o “fator quantidade” (Q) que é a fase sólida que armazena os fosfatos e abastecem a solução do solo (fase não lábil ou moderadamente lábil) (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). O “fator capacidade”, é a razão de equilíbrio entre a quantidade de P (Q) e o P em solução (I), e é conhecido como “poder-tampão” de fosfato, que significa a medida da capacidade do solo em manter um nível determinado de P na solução (SILVA; van RAIJ, 1999).

A disponibilidade de P para as plantas é avaliada através de extração química. Os métodos utilizados possuem capacidades diferentes de extração e nem sempre apresentam boa correlação com a quantidade de P absorvida pelas plantas. Soluções extratoras ou agentes de troca iônica, são utilizados para avaliação de P disponível, com o objetivo de quantificar o P capaz de ser reposto à solução do solo, após a absorção pelas plantas. O extratores utilizados são normalmente soluções de reagentes químicos, classificados conforme os modos de ação em: dissolução ácida; troca iônica; complexação de cátions e hidrólise de cátions. Os mais utilizados atualmente são o Mehlich1 ( $H_2SO_4$  0,0125 mol L<sup>-1</sup> + HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup>), o Mehlich3 ( $CH_3COOH$  0,2 mol L<sup>-1</sup> +  $NH_4NO_3$  0,25 mol L<sup>-1</sup> +  $NH_4F$  0,15 mol L<sup>-1</sup> +  $HNO_3$  0,013 mol L<sup>-1</sup> + EDTA 0,001 mol L<sup>-1</sup>) e o a resina trocadora de íons – RTI (SILVA, 2009).

Para extrações através de dissolução ácida, são utilizados ácidos fortes diluídos ou ácidos fracos, esses dissolvem parcialmente os coloides inorgânicos, e deles são extraídos, o fósforo ligado ao cálcio (P-Ca), ao alumínio (P-Al) e ao ferro (P-Fe). Os extratores de troca iônica substituem o fósforo dos sítios de adsorção dos coloides por ânions da solução extratora, os mais utilizados são o bicarbonato, o citrato, o lactato e o sulfato. Esses extratores atuam na energia de ligação com o coloide e permitem a extração de cátions trocáveis que se transferem do solo para resina (SILVA, 2009). Extratores de complexação de cátions atuam no metal do

grupo funcional dos coloides. Uma solução extratora com fluoreto ou alguns ânions orgânicos (citrato e lactato), complexam alumínio, e extraem as formas de P-Al. O bicarbonato por exemplo complexa o cálcio precipitando o  $\text{CaCO}_3$ , e liberando o P de compostos P-Ca. Na extração através da hidrólise, as soluções extratoras promovem a dissolução dos compostos P-Al e P-Fe, através da hidrólise do Fe e do Al presentes na superfície dos coloides. Isso ocorre em pH alto devido aos aníons hidroxila presente nas soluções (SILVA; van RAIJ, 1999).

Os métodos para análise de P mais utilizados no Brasil são os de Mehlich1 e o Resina trocadora de íons (RTI). O Mehlich1 é utilizado pela Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo nos Estados do Rio Grande do Sul, Paraná e de Santa Catarina. O RTI é também utilizado como um método alternativo para alguns casos especiais nesses dois estados RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004) e é o método oficial no estado de São Paulo (van RAIJ, 2001).

O método de Mehlich1 se caracteriza por uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações com pH de 2 à 3. O P é extraído através de uma dissolução ácida dos compostos fosfatados de energia fraca, sendo maior para fosfatos de cálcio, seguido dos fosfatos ligados ao Al e, por último dos ligados ao Fe. O método utiliza a dissolução ácida, mas ocorre também um efeito secundário de troca iônica nos sítios de adsorção, como no íon sulfato pelo fosfato. As vantagens do método são a facilidade de execução e o baixo custo das análises, sendo recomendado para solos com predominância de caulinita na fração argila, baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e ácidos (MOREIRA; MALAVOLTA; MORAES, 2002).

Esse método apresenta problema na estimativa de teores de P no solo, em relação a capacidade total de extração em diferentes teores de argila e grau de intemperização do solo, isso foi contornado quando se agrupou os solos em quatro classes distintas conforme o teor de argila (NOVAIS; SMYTH, 1999). Esse método também pode superestimar a disponibilidade de P em solos previamente adubados com fosfatos naturais (GATIBONI *et al.*, 2003). A interpretação do método Mehlich1 é realizada com base em amostragem da camada superficial de 0 a 20 cm conforme Tabela 3.

**Tabela 3.** Interpretação de análise de solo para P extraído pelo método Mehlich1, de acordo com o teor de argila, em sistemas de sequeiro com culturas anuais.

Teor de argila %	Teor de P no solo				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
≤ 15	0 a 0,6	6,1 a 12,0	12,1 a 18,0	18,1 a 25,0	> 25,0
16 a 35	0 a 0,5	5,1 a 10,0	10,1 a 15,0	15,1 a 20,0	> 20,0
36 a 60	0 a 0,3	3,1 a 5,0	5,1 a 8,0	8,1 a 12,0	> 12,0
> 60	0 a 0,2	2,1 a 3,0	3,1 a 4,0	4,1 a 6,0	> 6,0

Adaptado de SOUSA; LOBATO; REIN,2004

O método RTI em lâminas ou esferas, não utiliza qualquer reagente químico, extraindo em princípio apenas as formas solúveis e lábeis de P, pois, possui sítios permanentes de adsorção de ânions. Esse método está baseado no fato de que o solo é um trocador de íons (van RAIJ, 2001). O pH da suspensão resina-solo é semelhante ao pH do solo. O método resina não superestima a disponibilidade do P em solos alcalinos que recebem fosfatos naturais (OLIVEIRA, *et al.*, 2015). A interpretação do método Resina é realizada em amostragens da camada superficial de 0 a 20 cm conforme Tabela 4.

**Tabela 4.** Interpretação de análise de solo para P extraído pelo método da resina trocadora de íons, em sistemas agrícolas de sequeiro e irrigados com culturas anuais.

Sistema agrícola	Teor de P no solo				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
mg/dm <sup>3</sup>					
Sequeiro	0 a 5	6 a 8	9 a 14	15 a 20	> 20
Irrigado	0 a 8	9 a 14	15 a 20	21 a 35	> 35

Adaptado de SOUSA; LOBATO; REIN,2004.

Os métodos de extração são geralmente rápidos, pouco onerosos e possuem boa praticidade na execução em rotina de laboratório. As variações nas características do solo, indicam a necessidade de avaliações de extractores de P, com relação a capacidade de extração, bem como, na eficiência dos extractores utilizados, visando predizer de forma mais precisa as quantidades do elemento que

estão à disposição das culturas (MOREIRA; MALAVOLTA, 2001). Sendo primordial que os métodos extratores de P sejam versáteis e estimem com precisão o P disponível, bem como sejam capazes de correlacionar com a absorção das plantas (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

## 2.7. ADUBAÇÃO FOSFATADA

Em condições de agricultura tropical, o P é um dos nutrientes que merece mais atenção, pois a disponibilidade em condições naturais é baixa, bem como, tem menor capacidade de suprir as plantas, sendo que, a adubação fosfatada se torna imprescindível para produção agrícola (GOEDERT; GOMES DE SOUSA; REIN, 1986).

As recomendações e a eficiência da adubação fosfatada dependem da disponibilidade de fósforo no solo, pois as plantas retiram da solução do solo o P necessário para seu desenvolvimento. Normalmente os teores de P em solos altamente intemperizados é muito baixa, além disso esses solos tem capacidade de reter o P na fase sólida. Uma grande parte do P aplicado através da adubação tende a precipitar com o Al, o Fe e o Ca ou ainda ser adsorvida nos óxidos de Fe, Al e superfície das argilas (RESENDE; FURTINI NETO, 2007).

As plantas absorvem o P como ânion  $H_2PO_4^-$  e  $HPO_4^{2-}$  retirando da solução do solo as quantidades necessárias para seu desenvolvimento. Quando os adubos fosfatados são aplicados, parte do P fica indisponível (P não-lábil e P lábil) e outra é disponibilizada na solução do solo. A eficiência na recuperação desse nutriente indisponível, depende principalmente da espécie cultivada, da textura do solo, dos tipos de minerais de argila, poder tampão e da acidez do solo. Devido a essas características dos solos e para manter a disponibilidade do nutriente, grandes quantidades de P são aplicadas, sendo esse um dos investimentos mais altos para a prática da agricultura, principalmente quando utilizado fosfatos acidulados de alta solubilidade. (SOUSA; LOBATO, 2004). A resposta das culturas a adubação fosfatada vai depender da disponibilidade de P no solo, de outros nutrientes, da espécie, variedade e condições climáticas.

Para culturas como milho (*Zea mays* L.), soja e trigo (*Triticum aestivum* L.), Lobato (1982) demonstrou que em Latossolos argilosos, a aplicação de fosfatos solúveis em água, a lanço ou incorporados, as produções foram muito pequenas, mas, incrementos aconteceram quando se aplicou 300 Kg/ha de  $P_2O_5$ . Na produção

de cereais são usados preferencialmente fosfatos solúveis, pois a maioria das rochas nacionais são de baixa reatividade com elevados teores de ferro e alumínio e baixa disponibilidade de P para as culturas (LANA *et al.*, 2004).

Para a produção de fertilizantes fosfatados de alta solubilidade, são utilizados enxofre (S) importado, concentrados fosfáticos com elevado teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e com baixo conteúdo de impurezas e de alto custo, além disso são utilizados ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) para solubilização do material, isso normalmente proporciona limitações econômicas, industriais (RIEDER, 1986). Portanto, o processo de produção dos fertilizantes fosfatados solúveis eleva bastante o custo final dos mesmos, e muitas vezes, os torna inacessíveis nas quantidades necessárias à parte dos agricultores (REIS, 2002).

Fontes de P de menor solubilidade como os fosfatos naturais reativos e os fosfatos naturais, de lenta solubilização e com menor EA, têm sido usados como fontes alternativas de menor custo econômico, pois as rochas fosfatadas são apenas moídas, envolvendo, portanto, menores custos. Mas esses fosfatos dependem de condições como pH baixo e a presença de dreno de P e Ca para que possam acelerar o processo de dissolução no solo (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Estudos sobre a eficiência de fontes de P e fontes alternativas, são importantes, para recomendar ao produtor o melhor manejo para cada adubo fosfatado, fonte mais eficiente, bem como, orientar a indústria de transformação (GOEDERT, GOMES DE SOUSA; REIN, 1986).

### **3. HIPÓTESES E OBJETIVOS**

#### **3.1. HIPÓTESES**

Solos com menor teor de argila podem proporcionar maior aproveitamento do P pela soja, quando são utilizadas fontes de alta reatividade.

Fosfatos acidulados são mais eficientes do que os naturais, tanto em solos argilosos como em solos arenosos.

A aplicação de doses maiores de P, de diferentes fontes, beneficia o aumento nos valores dos componentes de produtividade.

#### **3.2. OBJETIVO**

Avaliar fontes e doses de fósforo (P) no cultivo da soja, em dois solos, com diferentes teores de argila.

#### **3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Determinar o Índice de Eficiência Agronômica (IEA) e o Equivalente Superfosfato Triplo (EqSFT) das fontes de P utilizadas em Neossolo com textura arenosa e Latossolo com textura argilosa.

Demonstrar, através de análises de componentes de produção da soja (peso de grãos (PG), massa seca de parte aérea (MSPA), número de vagens (NV), número de grãos por vagem (NGV) e peso de 100 sementes (P100), o efeito de fontes e doses de adubos fosfatados.

Avaliar por meio de análises de grão e folhas a relação entre os teores de P e Zn nas fontes e doses de adubos fosfatados.

Avaliar o incremento do teor de Ca nos solos em função das fontes de fósforo utilizadas.

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Embrapa Soja, localizado no Município de Londrina nas coordenadas geográficas 23º11' 30.13" LS e 58º10' 58.06" LO, no Estado do Paraná. Os solos utilizados, foram um Neossolo Quartzarênico distrófico, de textura arenosa ( $88 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) do município de Dracena, SP, e um Latossolo Vermelho Amarelo eutrófico, de textura argilosa ( $840 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) do município de Taciba, SP. Ambos os solos tiveram as amostras coletadas na camada 0-20cm, em uma área de pastagem.

Após secagem ao ar, os solos foram passados em peneira de malha de 2 mm para destorroamento e uniformização. Amostras foram enviadas ao laboratório, para determinação das características, conforme métodos de análise de solo descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (EMBRAPA, 2017). Os resultados dos atributos químicos e físicos dos solos são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Principais atributos dos solos antes da implantação dos tratamentos

Características	Solo	
	Argiloso	Arenoso
pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,9	4,1
P- Mehlich1 (mg dm <sup>-3</sup> )	4,0	3,1
C - total (g dm <sup>-3</sup> )	12,6	12,1
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,0	0,0
H + Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2,7	3,5
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,6	0,7
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,3	0,4
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,1	0,1
S – SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,0	5,6
B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,3	0,3
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,7	0,7
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	87,6	118
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	22,3	31,8
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,9	2,0
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	40	720
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	120	90
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	840	88
Textura	Muito Argilosa	Arenosa
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,0	1,2
V%	53	21
CTC pH 7,0 (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	6,5	4,7
CTC (efetiva) (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,1	2,0

Para o experimento foram utilizados vasos com capacidade de 3,0 litros (unidades experimentais), providos de coletores para impedir a lixiviação dos nutrientes. Em seguida os vasos foram preenchidos com 2,7 kg de solo já corrigido.

A correção do solo foi realizada 30 dias antes do plantio, visando elevar o índice de saturação por bases ao valor de 60%, através da aplicação de calcário dolomítico com 40% de CaO, 15% de MgO, PN 108% e PRNT 86%, considerando os resultados da composição química do solo e as recomendações da Associação Nacional para Difusão de Corretivos Agrícolas (LOPES; SILVA; GUILHERME, 1990). Os nutrientes para a fertilização foram fornecidos usando-se soluções preparadas conforme Tabela 6, segundo recomendação para o cultivo em casa de vegetação descrita em Novais; Neves; Barros (1991). As fontes fosfatadas com

suas características utilizadas no experimento estão listadas na Tabela 7. Todas foram trituradas, passadas através de peneirada a 0,3 mm de abertura para uniformizar o tamanho das partículas e homogeneizadas. Em seguida, as amostras do solo de cada unidade experimental foram homogeneizadas, conforme os seus respectivos tratamentos.

O nitrogênio (N) foi suprido através da inoculação das sementes com *Bradyrhizobium elkanii*, juntamente com as soluções de cobalto (Co) e molibdênio (Mo) e os demais nutrientes de acordo com a Tabela 6. O magnésio (Mg) foi fornecido através do calcário (MgO 15%) aplicado para a correção da acidez do solo.

**Tabela 6.** Composições das soluções usadas no ensaio

Produto	Nome	Elemento	mg kg <sup>-1</sup>	Gramas de produto em 1 litro de água
KCl	Cloreto de potássio	K	50,0	11,60 <sup>(1)</sup>
		Cl	44,0	
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sulfato de potássio	S	50,0	15,80 <sup>(2)</sup>
		K	121,0	
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Ácido bórico	B	0,5	0,87 <sup>(3)</sup>
CoCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	Cloreto de cobalto	Co	0,1	0,03 <sup>(4)</sup>
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	Sulfato de cobre	Cu	1,5	2,23 <sup>(3)</sup>
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	Sulfato de ferro	Fe	5,0	2,48 <sup>(3)</sup>
MnSO <sub>4</sub>	Sulfato de manganês	Mn	5,0	3,83 <sup>(3)</sup>
H <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub>	Ácido molibdico	Mo	0,1	0,02 <sup>(3)</sup>
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	Sulfato de zinco	Zn	5,0	5,83 <sup>(3)</sup>

(1) Utilizar 50 ml de solução por vaso de 3 kg de terra.

(2) Utilizar 100 ml de solução por vaso de 3 kg de terra.

(3) Utilizar 30 ml de solução por vaso de 3 kg de terra.

(4) Aplicado junto com a semente.

**Tabela 7.** Características dos adubos fosfatados

Característica	Fontes			
	SFT <sup>(1)</sup>	FNAI <sup>(2)</sup>	FNRAr <sup>(3)</sup>	Supraphos
	%			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	43,0	24,0	29,0	22,0
P	18,7	7,0	12,6	9,6
Ca	13,0	20,0	0,0	26,0
Solúvel em água	39,7	5,0	0,0	0,0
Solúvel em ácido cítrico 2%	39,0	11,0	7,0	18,9
Solúvel citrato de amônio + água	41,6	9,0	9,0	9,0

<sup>1</sup> Superfosfato triplo<sup>2</sup> Fosfato natural Alvorada<sup>3</sup> Fosfato natural reativo Argélia

O fosfato natural reativo da Argélia (FNRAr) é uma fonte de P de origem sedimentar e orgânico, formado pela deposição e posterior decomposição de restos de animais marinhos de minas superficiais, litorâneas da região de Djebel-Onk, na Argélia e possui alta reatividade.

O fosfato Alvorada (FNAI) é um fosfato natural de rocha magmática reativa de minas superficiais, amorfó, forma mais “mole”, média reatividade, extraída de uma jazida com características únicas no Brasil, localizada no Morro do Serrote na cidade de Alvorada – SP, produzida mecanicamente (britagem, rebritagem, secagem e moagem) sem sofrer nenhum processo químico que altere sua natureza.

O Supraphos é um fosfato precipitado, obtido a partir, do tratamento das águas ácidas de processo industrial. As águas ácidas são neutralizadas pela adição de cal, e retornam ao processo industrial, o resíduo obtido é composto de uma massa sólida e o fosfato precipitado.

Foram semeadas dez sementes por vaso com a cultivar de soja BRS 360 RR de ciclo precoce e grupo de maturidade relativa 6.0. Após desbaste, foram deixadas apenas três plantas uniformes por vaso. Durante o experimento foram realizadas regas diárias, para manter próximo a 70% da capacidade de campo e repor a água perdida por evapotranspiração. Os vasos foram pesados a fim de se determinar a quantidade de água a ser repostada. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, esquema fatorial 2x4x4 e três repetições com os tratamentos conforme apresentado na Tabela 8.

**Tabela 8.** Solos, fontes e doses dos adubos fosfatados

Solos	Fontes	Doses de P (mg kg <sup>-1</sup> )
Argiloso	Controle	0
		50
	Superfosfato triplo (SFT)	100
		200
		50
	Fosfato natural de Alvorada (FNAI)	100
		200
		50
	Fosfato natural da Argélia (FNRAr)	100
		200
Arenoso		50
	Supraphos	100
		200
		50
	Superfosfato triplo (SFT)	100
		200
		50
	Fosfato natural de Alvorada (FNAI)	100
		200
		50
Arenoso	Fosfato natural da Argélia (FNRAr)	100
		200
		50
	Supraphos	100
		200

A soja foi cultivada até o final do ciclo e foram avaliadas as característica de fitomassa total da parte aérea (folhas + ramos + pecíolos + pedúnculos e vagens), que foi obtida por meio da coleta do material vegetal senescente durante o experimento e o restante ao final, sendo que o material coletado de cada vaso foi seco em estufa de circulação de ar forçado a 65 °C por 72 horas, para determinação da matéria seca de parte aérea (MSPA). A colheita do experimento foi realizada após o estádio de maturação fisiológica (R8), as sementes foram acondicionados em sacos de papel e mantidos em estufa com circulação forçada de ar, a 60°C, até massa constante, a fim de uniformizar o teor de água e, após, determinou-se o peso

de grãos (PG) e o peso de 100 sementes (100sem) através de pesagem em balança semianalítica. Foi realizada a contagem simples para determinar o número de grãos por vagem (NGV) e número de vagens (NV).

Após a coleta das plantas, amostras de solo dos vasos foram retiradas da casa de vegetação e secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, por 48 horas, moídas e peneiradas em peneira com malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

Para as análises de cálcio (Ca) e zinco (Zn) do solo utilizou-se extração com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup> (TEIXEIRA *et al.*, 2017 & VETTORI, 1969) com posterior análise espectrofotométrica (SILVA, 2009).

Para a determinação dos níveis de P no solo, as amostras foram analisadas por dois extratores: método da resina trocadora de íons (van RAIJ, 1986), Mehlich1 com solução de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0,0125 mol L<sup>-1</sup> + ácido clorídrico (HCl) 0,05 mol L<sup>-1</sup> (MEHLICH, 1978) com posterior análise espectrofotométrica (SILVA, 2009). pH em foi determinado em solução 0,01 mol L<sup>-1</sup> de (CaCl<sub>2</sub>) (TEIXEIRA; CAMPOS; SALDANHA, 2017).

Ao final do experimento foi determinado também o P e o Zn das folhas e grãos, o método utilizado foi da digestão úmida em forno de micro-ondas utilizando ácido nítrico (HNO<sub>3</sub> 65%) + ácido perclórico (HClO<sub>4</sub> 72%) e posterior determinação simultânea de multi- elementos através do ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry), ou em português, Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (SILVA, 2009).

A avaliação da resposta aos adubos fosfatados foi realizada pelo rendimento de grãos, através da variável peso de grãos (PG), o qual permitiu o cálculo do Índice Eficiência Agronômica (IEA) e Equivalente em Superfosfato Triplo (EqSFT), conforme (GOEDERT; GOMES DE SOUSA; REIN, 1986):

$$IEA(\%) = \frac{(P_n - P_0)}{P_{SFT} - P_0} \times 100$$

$$EqSFT(\%) = \frac{P_{SFT}}{P_n} \times 100$$

Sendo:

$P_n$ : produção obtida com a rocha fosfatada na dose n;

$P_0$ : produção da controle (0 mg kg<sup>-1</sup> de P);

$P_{SPT}$ : produção obtida com a fonte solúvel na dose.

Os resultados foram analisados pelo software estatístico R, submetidos a análise de variância (teste F) de acordo com o delineamento proposto. Após análise de variância, os resultados quando F significativo ( $p \leq 0,05$ ) foram comparados através do teste de médias da combinação de diferentes fatores com auxílio do teste de Tukey (5%) e regressões polinomiais (PIMENTEL-GOMES, 2009).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. ANALISE DO SOLO

#### 5.1.1 FÓSFORO NO SOLO

Quanto aos teores de P no solo houve diferença significativa em ambos os solos (argiloso e arenoso), entre as doses e fontes testadas para os dois métodos utilizados na extração de P. Foi observado em todos os tratamentos que conforme foram aumentadas as doses houve o aumento do teor de P em ambos os solos argiloso e arenoso (Tabelas 9 e 10). Quando comparado os resultados entre os dois solos os dados demonstraram que o Mehlich1 foi mais sensível ao teor de argila do solo, extraindo em média quantidades menores de fósforo no solo mais argiloso (Tabelas 9 e 10).

As equações de regressão demonstram que o melhor modelo ajustado foi o linear, com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) acima de 0,82, cuja dose máxima estimada (DME) tanto para o P Mehlich1, quanto para o P Resina está em 200 mg  $kg^{-1}$  (Tabela 11).

**Tabela 9.** Teor de fósforo (P) pelo metodo Mehlich1 (P Meh1) e Resina (P Res), pH, cálcio (Ca) e zinco (Zn) no solo influenciado pela fonte e dose de P em solo

<b>Solo</b>	<b>Fonte</b>	<b>Dose (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P Meh1 (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>P Res (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>pH</b>	<b>Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Zn (mg dm<sup>-3</sup>)</b>
<b>Argiloso</b>	FNAI	0	6,00	5,30	5,00	18,00	4,70
	FNRAr		6,00	5,30	5,00	18,00	4,70
	SFT		6,00	5,30	5,00	18,00	4,70
	Supraphos		6,00	5,30	5,00	18,00	4,70
	FNAI	50	40,20 b	15,33 b	4,96 ab	21,66 b	5,20
	FNRAr		42,57 a	11,33 c	4,83 bc	18,00 bc	5,40
	SFT		26,50 c	15,33 b	4,63 c	16,00 c	5,30
	Supraphos		33,10 b	31,33 a	5,10 a	26,22 a	5,20
	FNAI	100	89,94 a	20,33 c	4,93 b	20,66 b	4,10
	FNRAr		49,40 b	24,66 b	4,63 c	18,66 b	5,00
	SFT		45,69 b	31,66 ab	4,66 c	17,66 b	6,60
	Supraphos		80,62 a	89,33 a	5,23 a	31,66 a	5,30
	FNAI	200	166,53 a	35,33 c	5,00 ab	23,00 b	3,90
	FNRAr		128,86 ab	59,33 b	4,53 c	21,00 b	6,50
	SFT		92,10 b	62,00 b	4,80 b	21,66 b	5,20
	Supraphos		154,68 a	164,00 a	5,20 a	36,00 a	4,80
<b>Teste F</b>							
		CV %	<b>3,37</b>	<b>7,46</b>	<b>1,09</b>	<b>7,90</b>	<b>43,14</b>
		Fonte	<b>25,07*</b>	<b>37,69*</b>	<b>38,22*</b>	<b>83,54*</b>	<b>0,13<sup>ns</sup></b>
		Dose	<b>1446,26*</b>	<b>635,91*</b>	<b>3,79*</b>	<b>39,87*</b>	<b>2,34<sup>ns</sup></b>
		Fonte x Dose	<b>4,29*</b>	<b>6,40*</b>	<b>6,21*</b>	<b>11,55*</b>	<b>0,46<sup>ns</sup></b>

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si na mesma coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. \* significativo e **ns** - não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F. **FNAI**: Fosfato Natural de Alvorada, **FNRAr**: Fosfato Natural reativo da Argélia, **SFT**: Superfosfato triplo.

**Tabela 10.** Teor de P pelo metodo Mehlich1 e Resina, pH, Ca e Zn no solo influenciado pela fonte e de P em solo arenoso de doses de fosforo aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso.

<b>Solo</b>	<b>Fonte</b>	<b>Dose (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>P Meh1 (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>P Res (mg dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>pH</b>	<b>Ca (mmolc dm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Zn (mg dm<sup>-3</sup>)</b>
<b>Arenoso</b>	FNAI		14,80	5,70	6,30	19,00	8,20
	FNRAr	0	14,80	5,70	6,30	19,00	8,20
	SFT		14,80	5,70	6,30	19,00	8,20
	Supraphos		14,80	5,70	6,30	19,00	8,20
	FNAI		81,50 a	13,00 b	6,53 a	17,30	10,90
	FNRAr	50	75,70 a	17,00 b	6,00 b	15,00	8,40
	SFT		49,20 b	23,33 b	6,03 b	16,30	7,70
	Supraphos		80,13 a	80,33 a	6,50 a	20,70	9,60
	FNAI		94,10 c	20,33 d	6,50 a	18,00	8,40
	FNRAr	100	128,58 ab	38,33 c	6,03 bc	20,70	8,40
	SFT		99,04 bc	64,00 b	6,00 c	18,30	8,70
	Supraphos		152,35 a	148,00 a	6,30 ab	19,30	8,90
	FNAI		170,65 ab	33,66 d	6,56 a	19,00	9,40
	FNRAr	200	207,51 a	89,66 c	5,63 c	23,70	9,60
	SFT		143,36 b	132,00 b	6,10 b	22,30	9,50
	Supraphos		194,33 a	190,00 a	6,33 ab	23,70	7,60
<b>Teste F</b>							
		CV %	<b>2,83</b>	<b>8,93</b>	<b>1,05</b>	<b>5,70</b>	<b>18,43</b>
		Fonte	<b>15,99*</b>	<b>198,00*</b>	<b>34,97*</b>	<b>2,31<sup>ns</sup></b>	<b>0,84<sup>ns</sup></b>
		Dose	<b>993,87*</b>	<b>420,28*</b>	<b>4,14*</b>	<b>9,77*</b>	<b>9,85*</b>
		Fonte x Dose	<b>4,40*</b>	<b>28,02*</b>	<b>6,04*</b>	<b>1,76<sup>ns</sup></b>	<b>0,33<sup>ns</sup></b>

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si na mesma coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. \* significativo e ns - não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F. **FNAI**: Fosfato Natural de Alvorada, **FNRAr**: Fosfato Natural reativo da Argélia, **SFT**: Superfosfato triplo.

**Tabela 11.** Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas fósforo pelo método Mehlich1, Resina, Ca e Zn em no solo (Y), como variável dependente de doses de P aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso

<b>Solo</b>	<b>Fonte</b>	<b>Variável</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>DME</b>
<b>FNAI</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 4,403 + 0,8147X$	0,98*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 6,333 + 0,1457X$	0,91*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 18,500 + 0,041X - 0,0004X^2$	0,42*	51	
	Zn	$\hat{Y} = 4,869$	ns	ns	
<b>FNRAr</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 10,408 + 0,610X$	0,96*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 0,800 + 0,278X$	0,95*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 17,533 + 0,016X$	0,31*	200	
	Zn	$\hat{Y} = 4,406$	ns	ns	
<b>Argiloso</b>					
<b>SFT</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 4,7358 + 0,4353X$	0,98*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 3,2667 + 0,2893X$	0,82*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 17,718 - 0,032X + 0,0003X^2$	0,85*	53	
	Zn	$\hat{Y} = 4,500$	ns	ns	
<b>Supraphos</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 2,0418 + 0,7608X$	0,97*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 0,800 + 0,8194X$	0,94*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 18,145 + 0,187X - 0,0005X^2$	0,96*	187	
	Zn	$\hat{Y} = 4,690$	ns	ns	
<b>FNAI</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 26,184 + 0,7326X$	0,94*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 5,9333 + 0,1398X$	0,96*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 18,800 - 0,025X + 0,0001X^2$	0,42*	125	
	Zn	$\hat{Y} = 8,546$	ns	ns	
<b>FNRAr</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 23,377 + 0,9517X$	0,94*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 0,0667 + 0,4312X$	0,91*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 17,982 - 0,017X + 0,0005X^2$	ns	ns	
	Zn'	$\hat{Y} = 9,228$	ns	ns	
<b>Arenoso</b>					
<b>SFT</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 19,713 + 0,6503X$	0,95*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 0,867 + 0,6528X$	0,92*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 18,618 - 0,040X + 0,0003X^2$	0,81*	67	
	Zn	$\hat{Y} = 7,064$	0,51*	ns	
<b>Supraphos</b>	P Meh1	$\hat{Y} = 32,533 + 0,8899X$	0,90*	200	
	P Res	$\hat{Y} = 27,000 + 0,904X$	0,89*	200	
	Ca	$\hat{Y} = 19,436 - 0,005X + 0,0001X^2$	0,66*	25	
	Zn	$\hat{Y} = 9,122$	ns	ns	

**DME**- Dose máxima estimada (mg kg<sup>-1</sup>) pela equação de regressão. \* significativo e ns não significativo a 5% de probabilidade. **FNAI**: Fosfato Natural de Alvorada, **FNRAr**: Fosfato Natural reativo da Argélia, **SFT**: Superfosfato triplo.

### 5.1.1.1. EXTRATOR MEHLICH1

O método Mehlich1 extraiu maiores quantidades de P quando comparado com a Resina em todos os tratamentos e doses (Tabelas 9 e 10). Isso está de acordo com Oliveira *et al.*, (2015), que concluíram, que o método Mehlich1 superestima a predição da disponibilidade de P para as plantas quando comparado a Resina. Essa maior extração deve-se ao caráter ácido do extrator (SANTOS; KLIEMANN, 2005), cujos ácidos fortes de sua composição (HCl e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) provocam a dissolução da apatita que compõe a rocha fosfática. Já para o superfosfato triplo (SFT) os teores foram menores em comparação aos fosfatos naturais e o Supraphos em todas as doses. Conforme Ono *et al.* (2009) isso pode estar associado à alta solubilidade do SFT, que libera prontamente grande parte do P aplicado, o que propicia à planta maior incremento de biomassa, número de vagens, peso de grãos e maior imobilização do elemento P. Para a fonte Supraphos não foi observada superestimação em relação ao método Resina em nenhuma das doses, provavelmente pelo fato dessa fonte não ser proveniente de rochas fosfáticas e sim de resíduos ácidos provenientes da indústria.

No solo argiloso para a dose de 50 mg kg<sup>-1</sup>, a maior quantidade de P extraída pelo Mehlich1 foi no tratamento fosfato natural reativo da Argélia (FNRAr) com 42,5 mg dm<sup>-3</sup>. Na dose de 100 mg kg<sup>-1</sup> as fontes Supraphos e fosfato natural de Alvorada (FNAI) apresentaram maior quantidade de P extraído com 80,6 e 89,9 mg dm<sup>-3</sup> respectivamente e na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> essas mesmas fontes apresentaram 166 e 154 mg dm<sup>-3</sup>. A fonte SFT apresentou menores valores de P no solo em todas as doses, o que pode estar associado a sua liberação mais rápida, devido a ser uma fonte com maior solubilidade em agua e ácido cítrico a 2%.

Em contrapartida, no solo arenoso o Mehlich1 para a dose de 50 mg kg<sup>-1</sup> não houve diferença significativa entre os fosfatos naturais e o Supraphos. Na dose de 100 mg kg<sup>-1</sup> a fonte Supraphos apresentou maior quantidade de P com 152,3 mg dm<sup>-3</sup> e o FNRAr com 128 mg dm<sup>-3</sup>. Para a dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> as maiores quantidades de P no solo foram com FNRAr, Supraphos e FNAI com 201, 194 e 170 mg dm<sup>-3</sup> respectivamente. A fonte de SFT também apresentou menores valores nesse solo em todas as doses, provavelmente devido à sua solubilidade e liberação rápida.

### 5.1.1.2. EXTRATOR RESINA

Os resultados para o extrator Resina, mostraram que houve diferenças significativas para todas as fontes e doses, sendo que os valores de P extraídos foram menores que pelo Mehlich1, em média 40% em solo argiloso e 38% em solo arenoso (Tabela 9 e 10). Segundo van Raij; Quaggio; Silva (1986) o extrator Resina, a princípio, retira o P apenas nas formas solúveis e lábeis, não superestimando a quantidade de P disponível para as plantas.

A fonte Supraphos apresentou as maiores taxas de recuperação de P por Resina em todas as doses estudadas tanto em solo argiloso como em arenoso, sendo superior às demais fontes. O SFT teve a segunda maior recuperação de P nas doses de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> se igualando aos fosfatos naturais na dose menor, apresentando uma variação de 15 a 62 mg dm<sup>-3</sup> de P em solo argiloso, e 23 a 132 mg dm<sup>-3</sup> de P em solo arenoso, isso também demonstra que a Resina foi sensível ao teor de argila do solo devido a maior fixação de P no solo. Essa fixação é diretamente influenciada pela mineralogia da fração de argila, conteúdo de coloides amorfos, conteúdo de Al trocável e potencial de oxi-redução (NOVAIS; SMYTH, 1999).

No método Resina as fontes de fosfatos natural FNRAr e FNAl apresentaram os menores índices de P extraído. Esse resultado está de acordo com van Raij; Quaggio; Silva, (1986), que demonstraram que este método extraiu bem menos P de fosfatos naturais adicionados a solo, em comparação com extrator ácido (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,05 N), que superestimou a disponibilidade de P nas amostras de solo tratados com esses adubos insolúveis em água, mas solúveis em ácidos. Resultados obtidos por Souza *et al.*, (2014) demonstraram que Mehlich1 e/ou Resina removeram mais P dos tratamentos onde foram aplicados fosfato natural em relação aos tratamentos com o superfosfato triplo via adubação corretiva. Mumbach *et al.*, (2018) concluíram que aumentos nos teores de argila foram acompanhados pela redução na disponibilidade de P extraído por Mehlich1, Mehlich3 e Resina, indicando que todos os métodos foram sensíveis ao poder tampão do solo. Segundo Oliveira Júnior; Prochonow; Kleper (2011) solos com maiores concentrações de óxidos de Fe e Al, como os solos argilosos tem conteúdo maior de P, mas menor quantidade de extraível do nutriente em função da maior capacidade sortiva.

### 5.1.2. pH DO SOLO

O pH do solo indica a concentração de íons  $H^+$  na solução do solo, que tem influência na disponibilidade de nutrientes. Em todos os tratamentos testados houve alteração significativa do pH entre fontes e doses nos dois tipos de solo tabelas 09 e 10.

No solo com textura argilosa a aplicação dos fosfatos naturais produziu pequena diminuição do pH, na ordem de 0,19 unidades de pH em média. Quando a fonte de P foi FNAI, a diminuição do pH foi em média 0,05 unidades de pH e quando aplicado a fonte de FNRAr a redução foi de 0,34 unidades. Também para a fonte SFT houve pequena diminuição de 0,30 unidades de pH. Já com a fonte Supraphos houve uma pequena alta pH com 0,17 unidades. Em solo arenoso a fonte SFT diminuiu o pH em média 0,25 unidades, e para o FNRAr a diminuição foi de 0,41 unidades, considerando todas as doses. Para as fontes FNAI e Supraphos houve um aumento do pH de 0,23 e 0,07 unidades, respectivamente.

Essas pequenas alterações podem ser atribuídas ao poder tampão do solo, que define a resistência do solo à alteração de pH. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Prochnow (2014), que constatou que os solos se comportam como ácidos fracos tamponados com os íons  $H^+$  ligados ao complexo de troca catiônica do húmus e dos minerais de argila, o que proporciona o tamponamento da acidez ativa da solução do solo.

Sendo assim observou-se que no solo argiloso a alteração do pH do solo considerando todas as doses e fontes variou na faixa entre 4,5 à 5,2, sendo que na dose 0  $mg\ kg^{-1}$  o pH foi 5,0. Já em solo arenoso a variação do pH foi de 5,6 a 6,6 com pH de 6,3 no tratamento controle. Segundo Prochnow (2014), as mudanças no pH do solo pode influenciar a disponibilidade de vários nutrientes de maneira distinta, mas a disponibilidade de grande parte dos nutrientes é maior na faixa de pH de 5,8 a 6,5. As variações de pH encontradas neste trabalho estão em uma faixa onde não há prejuízo em relação à absorção de nutrientes. Segundo Vilar; Vilar (2013), taxas maiores de absorção de Pi ocorrem quando o pH está entre 4,5 e 6,0, sendo que nessa faixa a forma que é mais absorvida é  $H_2PO_4^-$ . Segundo Zoz *et al.*, (2009) concluíram que para fosfatos solúveis o aumento do pH reduziu a adsorção de P no solo, proporcionando maior disponibilidade, no entanto, os fosfatos naturais demonstraram baixa ou lenta liberação de P, devido sua baixa reatividade no solo,

visto que em condições ácidas são necessárias para a maior solubilização dos fosfatos naturais.

Alterações de pH causadas pelo superfosfato triplo, apesar deste ser considerado um fertilizante de reação neutra, pode ter sido devido ao tempo reação entre o ácido e a rocha fosfatada (tempo de cura) do fertilizante fosfatado; os novos fosfatos com fabricação mais recente podem apresentar um maior resíduo de ácido sulfúrico ou fosfórico do que os de fabricação mais antiga, causando o abaixamento do pH do solo (MOREIRA; MALAVOLTA; MORAES, 2002).

### 5.1.3. CÁLCIO

Com relação aos teores de cálcio no solo observou-se diferença significativa em todas as fontes e doses de fosfatos apenas em solo argiloso, sendo o Supraphos a fonte que proporcionou maior quantidade de Ca ao solo com a média entre todas as doses de  $31,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , isto ocorreu devido a esta fonte ter 26% de Ca na sua composição. Entre as outras fontes não houve diferenças significativas. A fonte Supraphos forneceu 63% mais Ca ao solo comparado com a média das outras fontes de P e 57% em relação a dose 0 de P no solo argiloso. Em solo arenoso não houve diferença significativa entre as fontes e doses de P, em relação ao fornecimento de Ca ao solo, provavelmente devido a maior eficiência da aplicação de calcário antes do plantio da soja.

Além disso, esse resultado pode ser atribuído à menor capacidade de retenção de cátions do solo arenoso, pois possui menos argila e matéria orgânica e essas possuem em sua superfície diversas cargas negativas. Como os opositos se atraem, as cargas positivas dos cátions se ligam a essas partículas, devido a isso o solo argiloso apresentou maior teor de cálcio no solo. Segundo De Maria *et al.*, (1993), em condições de campo, pode haver pouca mobilidade de Ca devido à baixa solubilização em solo arenoso.

### 5.1.4. ZINCO

Não foram observados efeitos das doses e fontes de P em relação à concentração do zinco nos dois solos utilizados (Tabelas 9 e 10). As equações de regressão para a variável Zn analisada como variável dependente de doses de P aplicadas nos solos argiloso e arenoso demonstraram resultados não significativos

(Tabela 11). Neste estudo observou-se apenas o aumento das concentrações em relação à análise de solo inicial do experimento, mas não houve diferença estatística entre as fontes e doses. Isso indica que não houve existência do efeito de inibição competitiva entre o P e Zn nos solos, ou seja, quando as doses foram aumentadas no solo não diminuiu a quantidade de zinco no solo argiloso nem em solo arenoso. Resultados diferentes foram obtidos por outros autores, conforme Santos; Kliemann (2005), em condições tropicais, cerca de 80% do P aplicado via fertilizante é adsorvido por óxidos de Fe e Al, que por consequência, aumenta as cargas negativas sobre estes coloides e pode aumentar a adsorção de Zn pelos óxidos do solo. Novo *et al.*, (2011) também afirmam que a formação de um complexo P – Zn nas superfícies orgânicas e inorgânicas dos coloides aumenta a adsorção de Zn pelo efeito da presença de fosfato. Os altos teores de Zn no solo devido a aplicação da adubação no plantio, podem ter minimizado este efeito.

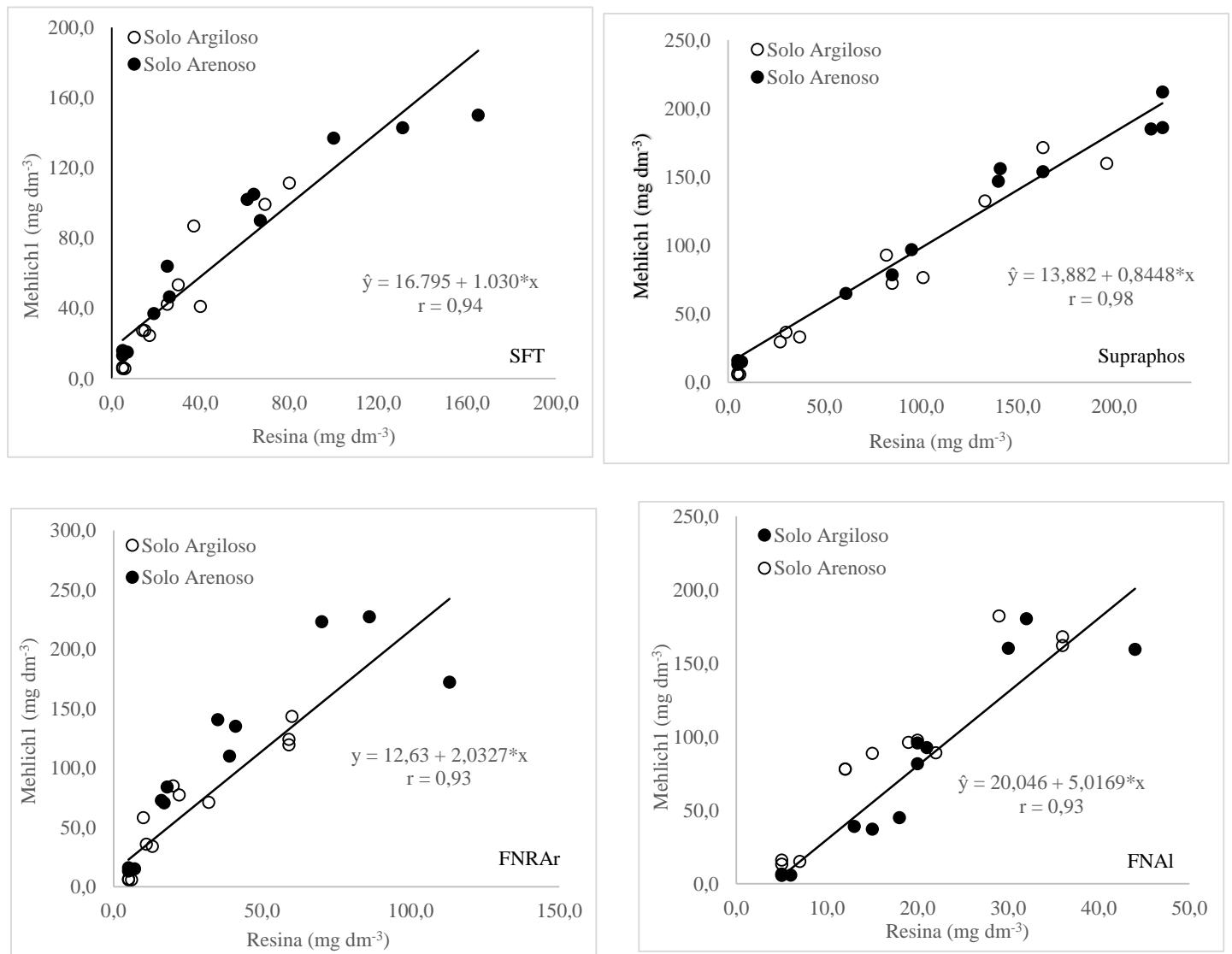
## 5.2. CORRELAÇÃO DOS EXTRATORES MEHLICH1 E RESINA

Para avaliar o comportamento dos extractores, foram feitos estudos de regressão entre as doses e fontes de P (Tabela 11) e de correlação dos teores de P extraído do solo ao final do experimento com os métodos Resina e Mehlich1 (Figura 3).

Os elevados coeficientes de regressão (Figura 3) dos dois extractores demonstra que ambos foram eficientes na avaliação de P disponível para os fosfatos naturais de Alvorada (FNAI), Argélia (FNRAr), para o Supraphos e o Surperfosfato Triplo (SFT) nos dois solos com coeficientes de correlação entre 0,93 e 0,98. Resultados semelhantes na utilização dos extractores na determinação do P disponível têm sido relatados por Moreira; Malavolta; Moraes (2002). Resultado corrobora as correlações feitas por Mumbach *et al.*, (2018) e reforça a posição, de que os extractores Mehlich1 e Resina podem ser usados como métodos de avaliação do P disponível e se enquadram satisfatoriamente sob condições de fertilidade do solo.

No caso do fosfato natural, do fosfato natural reativo, como os estudados e também no caso Supraphos, o extrator Mehlich1 superestimou os valores quando comparado ao SFT, como acontece na extração de P em solos tratados com os fosfatos naturais brasileiros, principalmente nas doses mais altas (BORTOLON *et*

al., 2011), no entanto, mesmo com esses resultados, o extrator apresentou sensibilidade em quantificar o P disponível no solo.



**Figura 3.** Correlação entre os métodos Resina (X) e Mehlich1 (Y) nas amostras coletadas no final do experimento com os tratamentos com SFT: Superfosfato triplo, FNRAr: Fosfato natural reativo da Argélia, Supraphos e FNAl: Fosfato natural Alvorada nos solos argilos e arenoso. \* significativo e a 5 % de probabilidade pelo teste F.

### 5.3. FÓSFORO E ZINCO NA FOLHA E NO GRÃO

#### 5.3.1. FÓSFORO NA FOLHA

Os teores foliares de P quando comparados com o controle foram estatisticamente significativos em solo argiloso para doses de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> e no solo arenoso para as doses de 50, 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> de P (Tabelas 12 e 13). Observou-se que as maiores remoções de P pela soja foram obtidas com as doses da fonte SFT. Foi possível constatar que os teores de P na folha foram maiores no solo arenoso, isso pode ser indício de que como no solo arenoso há uma menor adsorção de P, consequentemente houve maior disponibilidade de P e uma maior absorção pela planta. As diferenças significativas provavelmente, foram em razão da diferença na velocidade de solubilização e características entre as fontes. O SFT propiciou uma maior disponibilidade de P para a cultura que, com isto, apresentou maior quantidade de MSPA e maior NV e PG por vaso, em ambos os solos nas doses de 50 e 100 mg kg<sup>-1</sup>. Sarmento; Corsi; Campos (2001) verificaram comportamento similar, ao avaliarem a produção de massa seca (MS) de alfafa (*Medicago sativa L.*), constataram que as maiores produções de MS foram com a fonte de P de maior solubilidade. Lima; De Aquino; Nascimento, (2016) também verificaram em sorgo (*Sorghum spp.*) que o superfosfato triplo foi o que mais contribuiu para a absorção de P devido à sua alta solubilidade. Para a dose 200 mg kg<sup>-1</sup> de P com SFT apesar de apresentar os maiores valores na folha, não refletiu na MSPA, NV e PG, cujos maiores produções foram com FNRAr e o Supraphos em ambos os solos. Segundo Ono *et al.*, (2009), a inversão pode estar relacionada ao consumo de luxo nestas doses, o que estreita a relação entre o valor absorvido do elemento e o acúmulo de MSPA, NV e PG comparado com os absorvidos nas menores doses.

A dose máxima estimada (DME) de cada fonte que demonstra a absorção máxima de P na folha em cada solo ficou melhor representada pela equação linear (Tabela 14). Verifica-se que a soja apresentou respostas para absorção de P na folha com o aumento das doses de P em todas as fontes, mas isso não se refletiu em incrementos nos componentes de produção. Esse fato pode estar relacionado à Lei do Máximo, sendo: “ao se aumentar ainda mais as doses de um nutriente observa-se que os rendimentos começam a diminuir”. Nesse caso, é o excesso que pode limitar ou prejudicar a produção. Segundo Voisin (1973), o excesso de um

nutriente no solo reduz a eficácia de outros e, por conseguinte, pode diminuir o rendimento das colheitas.

### 5.3.2. ZINCO NA FOLHA

Os resultados para os teores de Zn na folha, em solo argiloso não mostraram diferença significativa entre doses e fontes de P (Tabela 12). Estes resultados demonstram ausência do efeito de inibição não competitiva entre o P e Zn descrito por Malavolta; Vitti; Oliveira, (1997) e Marschner (2012). No entanto, verificou-se que com o aumento das doses de P ocorreu a diminuição nos teores de Zn, porém, isto pouco refletiu nos componentes de produção e no teor de P (Tabela 16). Novo *et al.*, (2011) concluíram que sob condições de altas concentrações de P existe inibição fisiológica, diminuindo a translocação do Zn absorvido pelas raízes para a parte aérea das plantas. Rupa *et al.*, (2003) afirmam que altas doses de P incrementam a adsorção de Zn nas argilas, com isso, a solubilidade de Zn decresce, afetando sua absorção, translocação e utilização pelas plantas.

Sobre o conceito da interação P-Zn, afirmam Carneiro *et al.*, (2008), que a elevada disponibilidade de P pode induzir deficiência de Zn, isso pode ser uma hipótese para o fato de que ao dobrar as doses, pode ter diminuído o teor de Zn no tecido foliar, a qual pode ser corrigida pelo fornecimento do micronutriente no solo ou foliar.

Para o teor de Zn na folha em solo argiloso avaliados dentro de cada fonte, a DME foi obtida com a equação polinomial do 2º grau. Os resultados mostraram que: com 217 mg kg<sup>-1</sup> de P o teor médio de Zn na folha foi de 65,7 mg kg<sup>-1</sup> Zn com o FNAI; com 135 mg kg<sup>-1</sup> o teor médio foi de 69 mg kg<sup>-1</sup> para o FNRAr; e com 134 mg kg<sup>-1</sup> com teores médios de 66,8 mg kg<sup>-1</sup> e de 66,7 mg kg<sup>-1</sup> para o SFT e Supraphos, respectivamente (Tabelas 12 e 14). Segundo Kurihara *et al.*, (2013), valores entre 43 a 58 mg kg<sup>-1</sup> de Zn para a cultura da soja são considerados elevados. Provavelmente, devido à adubação de plantio e a disponibilidade de Zn no solo entre 4,7 e 6,6 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela 9), devido a aplicação de sulfato de zinco no plantio não houve deficiência na soja cultivada no solo argiloso (CARNEIRO *et al.*, 2008).

Para solo arenoso, os teores de Zn na folha apresentaram diferença significativa entre doses e fontes de P apenas na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 13), onde o tratamento com FNRAr apresentou 89,20 mg kg<sup>-1</sup> de Zn, e SFT com 81 mg kg<sup>-1</sup>, mesmo nesta dose neste solo, não foram observadas diminuições elevadas

dos teores, com o aumento das doses de P em relação ao Zn foliar. Isso pode ser um indicativo de que pelas propriedades do solo arenoso de adsorver menos os nutrientes, pode disponibilizar mais rapidamente, visto que as altas doses de P não aumentaram a adsorção de Zn no solo, devido a isso a solubilidade de Zn não decresceram, sem o efeito de inibição descrito por Marschner (2012). Segundo Machado; Souza (2012), solos com maior teor de argila ou com textura média, o maior teor de MO pode acarretar maior adsorção com o aumento das doses de P. Para as fontes FNRAr e SFT no solo arenoso, a DME foi de 66 mg kg<sup>-1</sup> de P o teor de 68 mg kg<sup>-1</sup> Zn na folha com FNRAr e 87 mg kg<sup>-1</sup> o teor foi de 62,6 mg kg<sup>-1</sup> Zn na folha com o SFT (Tabelas 13 e 14).

### 5.3.3. FÓSFORO NOS GRÃOS

Os teores de P nos grãos em solo argiloso foram significativos, as maiores exportações de P pela soja foram obtidas onde as fontes foram SFT e FNRAr principalmente nas maiores doses 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup>, com 6,9 e 8,5 g kg<sup>-1</sup> de P, com o SFT e 6,4 e 7,3 g kg<sup>-1</sup> com o FNRAr (Tabela 12). Em comparação ao controle, observou-se um aumento do teor de P do grão conforme as doses foram aumentando, com exceção do tratamento onde a fonte foi FNAI que apresentou um decréscimo. O melhor desempenho das fontes SFT e FNRAr, provavelmente deve estar relacionado a maior solubilidade em relação ao fosfato natural de Alvorada e Supraphos. Silva *et al.*, (2009) observaram que fosfatos com menor solubilidade apresentaram menor produção de MS de grãos quando comparada com a fosfatos mais solúveis e que as diferenças, são reflexos da própria natureza química de cada fonte utilizada. Os resultados com solo argiloso demonstram que o FNRAr teve teores de P nos grãos semelhantes ao SFT, indicando que a utilização de fosfato reativo importado parece ser boa alternativa, por apresentar maior solubilidade em relação ao nacional (Tabela 12). Conforme Corrêa *et al.*, (2005), a maior solubilidade dos fosfatos reativos foi devido ser proveniente de rochas de origem sedimentar, apresentando elevado grau de substituição de fosfatos por carbonatos e, consequentemente, menor cristalização.

Em solo arenoso os teores de P nos grãos foram menores que no argiloso e apresentaram diferença estatística entre as fontes nas doses de 50 e 200 mg kg<sup>-1</sup> de P, sendo o Supraphos e o SFT os que apresentaram maiores teores, com 5,3 e 5,7 g kg<sup>-1</sup> e 4,9 e 6,5 g kg<sup>-1</sup> de P respectivamente. Foi observado menor volume

radicular das plantas em solo arenoso e isso pode estar relacionado com menor eficiência na absorção de P.

#### **5.3.4 ZINCO NOS GRÃOS**

Os resultados observados na Tabela 12 demostram que no solo argiloso houve uma diferença significativa entre as fontes e doses de P para Zn nos grãos, também demonstram a existência de pequeno efeito de inibição entre o P e Zn quando se compara com o controle, conforme descrito por Malavolta; Vitti; Oliveira (1997). Os teores de Zn, porém, pouco refletiram na diminuição do peso de grãos e no teor de P (Figura 4A e Tabela 12). Os tratamentos que apresentaram maiores teores de zinco no grão em solo argiloso foram o FNAI e o Supraphos nas doses de 50 e 100 mg kg<sup>-1</sup> de P e o FNRAr com 54,5 mg kg<sup>-1</sup> de Zn na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> de P, provavelmente os fosfatos naturais por terem uma solubilidade menor que o SFT foram pouco influenciados pelo efeito de inibição P-Zn no solo, o que pode ter diminuído a adsorção de Zn, consequentemente maior foi a absorção e translocação pelas plantas.

Para o solo arenoso não houve diferença significativa em relação a fontes e doses de P para o teor de Zn nos grãos, nem foi observado o efeito de inibição de Zn pelo P (Tabela 13). Segundo Machado *et al.*, (2011) em solos arenosos ocorre uma tendência de maior disponibilidade deste nutriente uma vez que adsorção é menor em função da baixa concentração de argila. Para Zn no grãos o modelo que apresentou o melhor ajuste para as fontes de P foi a equação polinomial de segundo grau (Tabela 15), para ambos os solos demonstrando a DME.

**Tabela 12.** Teor de P e Zn na folha e no grão influenciado pela fonte e dose de P em solo argiloso.

Solo	Fonte	Dose (mg kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
			<b>Folha</b>		<b>Grão</b>	
	<b>FNAI</b>		0,97	136,70	4,70	64,60
	<b>FNRAr</b>		0,97	136,70	4,70	64,60
	<b>SFT</b>	0	0,97	136,70	4,70	64,60
	<b>Supraphos</b>		0,97	136,70	4,70	64,60
	<b>FNAI</b>		1,07	81,50	4,40 b	52,70 a
	<b>FNRAr</b>		1,16	78,10	5,07 ab	42,60 b
	<b>SFT</b>	50	1,09	65,10	6,24 a	42,27 b
	<b>Supraphos</b>		1,39	66,80	5,24 ab	53,70 a
<b>Argiloso</b>	<b>FNAI</b>		1,18 b	60,80	4,12 b	48,95 a
	<b>FNRAr</b>		0,95 b	63,50	6,39 a	30,06 c
	<b>SFT</b>	100	1,51 a	67,30	6,92 a	40,56 b
	<b>Supraphos</b>		1,37 ab	69,30	4,74 b	48,52 a
	<b>FNAI</b>		1,54 b	54,90	4,05 c	47,64 ab
	<b>FNRAr</b>		2,05 a	66,60	7,32 a	54,50 a
	<b>SFT</b>	200	2,94 a	68,00	8,52 a	44,44 b
	<b>Supraphos</b>		1,53 ab	64,10	5,29 b	47,70 ab
<b>Teste F</b>						
	<b>CV %</b>		<b>7,10</b>	<b>10,04</b>	<b>10,13</b>	<b>3,37</b>
	<b>Fonte</b>		<b>4,48*</b>	<b>0,03<sup>ns</sup></b>	<b>39,21*</b>	<b>7,86*</b>
	<b>Dose</b>		<b>43,30*</b>	<b>45,00*</b>	<b>17,58*</b>	<b>68,36*</b>
	<b>Fonte x Dose</b>		<b>4,02*</b>	<b>0,58<sup>ns</sup></b>	<b>7,85*</b>	<b>3,90*</b>

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si na mesma coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.  
 \* - significativo e ns - não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

**Tabela 13.** Teor de P e Zn na folha e no grão influenciado pela fonte e dose de P em solo arenoso.

Solo	Fonte	Dose (mg kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	P (g kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
			<b>Folha</b>		<b>Grão</b>	
	<b>FNAI</b>		0,75	41,00	3,88	52,00
	<b>FNRAr</b>		0,75	41,00	3,88	52,00
	<b>SFT</b>	0	0,75	41,00	3,88	52,00
	<b>Supraphos</b>		0,75	41,00	3,88	52,00
	<b>FNAI</b>		0,87 c	42,86	3,88 b	52,00
	<b>FNRAr</b>		1,95 ab	60,38	3,88 b	52,00
	<b>SFT</b>	50	1,98 a	60,23	4,89 ab	60,00
	<b>Supraphos</b>		1,24b bc	41,86	5,29 a	60,60
	<b>FNAI</b>		0,82 b	48,53	5,12	58,10
Arenoso	<b>FNRAr</b>		2,87 a	55,60	5,71	62,90
	<b>SFT</b>	100	3,37 a	46,84	5,52	55,90
	<b>Supraphos</b>		1,03 b	47,53	5,99	60,70
	<b>FNAI</b>		1,13 b	50,20 b	5,01 b	48,20
	<b>FNRAr</b>		3,66 a	89,20 a	4,88 b	52,70
	<b>SFT</b>	200	5,20 a	81,00 ab	6,56 a	53,40
	<b>Supraphos</b>		1,28 b	52,13 b	5,57 ab	53,10
	<b>Teste F</b>					
	<b>CV %</b>		<b>41,73</b>	<b>27,66</b>	<b>10,45</b>	<b>6,59</b>
	<b>Fonte</b>		<b>67,61*</b>	<b>2,65<sup>ns</sup></b>	<b>0,52<sup>ns</sup></b>	<b>2,73<sup>ns</sup></b>
	<b>Dose</b>		<b>74,29*</b>	<b>10,95*</b>	<b>11,87*</b>	<b>11,91*</b>
	<b>Fonte x Dose</b>		<b>10,76*</b>	<b>0,02*</b>	<b>8,49*</b>	<b>2,00<sup>ns</sup></b>

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si na mesma coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. \* - significativo e ns - não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

**Tabela 14.** Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas do P (g kg<sup>-1</sup>) e Zn (mg kg<sup>-1</sup>) na folha (Y), como variável dependente de doses de fosforo aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso.

<b>Solo</b>	<b>Fonte</b>	<b>Variável</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>DME</b>
<b>Argiloso</b>	<b>FNAI</b>	P	$\hat{y} = 0,945 + 0,003X$	0,60*	200
		Zn	$\hat{y} = 134,810 - 1,656X + 0,0038X^2$	0,88*	217
	<b>FNRAr</b>	P	$\hat{y} = 0,831 - 0,005X$	0,61*	200
		Zn	$\hat{y} = 135,410 - 1,325X + 0,0049X^2$	0,70*	135
	<b>SFT</b>	P	$\hat{y} = 0,735 + 0,010X$	0,84*	200
		Zn	$\hat{y} = 130,530 - 1,207X + 0,0045X^2$	0,80*	134
<b>Arenoso</b>	<b>Supraphos</b>	P	$\hat{y} = 1,110 + 0,0024X$	0,64*	200
		Zn	$\hat{y} = 130,470 - 1,150X + 0,0041X^2$	0,74*	134
	<b>FNAI</b>	P	$\hat{y} = 0,737 + 0,002X$	0,65*	200
		Zn	$\hat{y} = 57,871$	ns	ns
	<b>FNRAr</b>	P	$\hat{y} = 0,355 + 0,033X$	0,94*	200
		Zn	$\hat{y} = 56,807 - 0,318X + 0,0024X^2$	0,57*	66
	<b>SFT</b>	P	$\hat{y} = 1,131 - 0,073X$	0,86*	200
		Zn	$\hat{y} = 57,955 - 0,802X + 0,0046X^2$	0,87*	87
	<b>Supraphos</b>	P	$\hat{y} = 0,899 + 0,002X$	0,45*	200
		Zn	$\hat{y} = 48,687$	ns	ns

DME- Dose máxima estimada (mg kg<sup>-1</sup>) pela equação de regressão. \* significativo e ns não significativo a 5% de probabilidade.

**Tabela 15.** Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas do P e Zn no grão (Y), como variável dependente de doses de fosforo aplicadas (X) nos solos argiloso e arenoso.

<b>Solo</b>	<b>Fonte</b>	<b>Variável</b>	<b>Equação</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>DME</b>
<b>Argiloso</b>	<b>FNAI</b>	P	$\hat{Y} = 4,597$	ns	ns
		Zn	$\hat{Y} = 64,125 - 0,242X + 0,0008X^2$	0,88*	151
	<b>FNRAr</b>	P	$\hat{Y} = 4,665 + 0,0138X$	0,78*	200
		Zn	$\hat{Y} = 62,358 - 0,353X + 0,0007X^2$	0,68*	252
	<b>SFT</b>	P	$\hat{Y} = 4,997 + 0,183X$	0,88*	200
		Zn	$\hat{Y} = 63,135 - 0,420 + 0,0016X^2$	0,83*	131
	<b>Supraphos</b>	P	$\hat{Y} = 4,81$	ns	ns
		Zn	$\hat{Y} = 64,419 - 0,243X + 0,0008X^2$	0,84*	152
<b>Arenoso</b>	<b>FNAI</b>	P	$\hat{Y} = 4,160$	ns	ns
		Zn	$\hat{Y} = 50,612 + 0,117X - 0,0006X^2$	0,45*	97
	<b>FNRAr</b>	P	$\hat{Y} = 3,999 + 0,035X - 0,0001X^2$	0,72*	87
		Zn	$\hat{Y} = 50,922 + 0,155X - 0,0007X^2$	0,34*	111
	<b>SFT</b>	P	$\hat{Y} = 4,080 + 0,013X$	0,81*	200
		Zn	$\hat{Y} = 53,169 + 0,101X - 0,0005X^2$	0,37*	101
	<b>Supraphos</b>	P	$\hat{Y} = 3,893 + 0,034X - 0,0001X^2$	0,71*	170
		Zn	$\hat{Y} = 52,502 + 0,181X - 0,0009X^2$	0,54*	100

DME- Dose máxima estimada ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) pela equação de regressão. \* significativo e ns não significativo a 5% de probabilidade.

**5.4. COMPONENTES DE PRODUÇÃO [PESO DE GRÃOS (PG), MASSA SECA DE PARTE AÉREA (MSPA), NÚMERO DE VAGENS (NV), NÚMERO DE GRÃOS POR VAGEM (NGV) E PESO DE 100 SEMENTES (P100)]**

As médias dos componentes de produção são apresentadas nas tabelas 16 e 17 de acordo com cada variável; solo, fontes e doses de P aplicadas. Na Tabela 18 são apresentadas as equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas e a DME de cada fonte, na figura 4 estão os gráficos e as equações de regressão para PG.

Verificou-se nesse estudo que para as produções de MSPA e NV tanto em solo argiloso como no arenoso os resultados foram influenciados pelas doses e fontes de P. Já para NGV e peso de 100 sementes (P100) não houve diferença significativa entre fontes e doses (Tabelas 16 e 17). Observou-se que para MSPA, as médias das respostas em solo argiloso apresentaram aumento na produção, ou seja, tal resultado foi acompanhado com o aumento das doses em todas as fontes de P. A maior produção para MSPA em solo argiloso foi com FNRAr na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> com 35,8 g por vaso, seguido da fonte SFT nas doses de 200 e 100 mg kg<sup>-1</sup> com 34,4 e 33,9 g por vaso respectivamente. O Supraphos apresentou resultado próximo a SFT e FNRAr na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> com 30,30 g por vaso (Tabela 16).

Para o NV no solo argiloso os melhores resultados foram para SFT e FNRAr na dose de 100 e 200 mg kg<sup>-1</sup> de P respectivamente e para o Supraphos na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> (Tabela 16). No arenoso os melhores resultados para os fosfatos mais reativos SFT e FNRAr foram na dose de 50 mg kg<sup>-1</sup>, e o FNAI e Supraphos que são menos reativos a melhores resultados foram na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup>, sendo bem baixos na ausência de P (Tabela 17).

No solo arenoso, as médias apresentaram uma diminuição na produção MSPA e NV, conforme aumentam as doses, demonstrando que a utilização de fonte solúvel, como o SFT, as plantas respondem melhor nas menores doses de P nesse tipo de solo, isso pode ser devido a menor adsorção de P no solo arenoso. Segundo Machado *et al.*, (2011) em solos arenosos, existe uma tendência de menor adsorção de P, consequentemente, a disponibilidade aumenta, isso é devido à baixa

concentração de argila e menor teor de matéria orgânica (MO). Neste solo a maior produção de MSPA foi obtida com a fonte SFT nas doses de 50 e 100 mg kg<sup>-1</sup> com 32,9 e 30,7 g por vaso respectivamente, seguido da fonte FNRAr na dose 50 mg kg<sup>-1</sup> com 29,1 g por vaso. Esses resultados concordam com Silva *et al.*, (2009), que demonstraram que fontes com alta solubilidade em ácido cítrico, proporcionaram as maiores produções de MS, em relação aos fosfatos naturais menos solúveis. Marin *et al.*, (2015) observaram efeito semelhante em fosfatos mais solúveis no vigor de sementes de soja, ao contribuir para o aumento de produtividade da soja.

Houve um ajuste quadrático e significativo para os dois solos nas variáveis MSPA e NV (Tabela 18), no entanto, pouca amplitude de variação foi observada entre os tratamentos no solo argiloso e uma maior amplitude no solo arenoso. Para o NGV e P100 os resultados não foram significativos. Tais resultados podem ser explicados pelo fato de que o NGV e o P100 praticamente não aumentaram quando utilizadas doses superiores.

Para PG os gráficos dos estudos de regressão entre as doses e fontes de P (Figuras 4 A e B), mostraram tendência quadrática e significativa para os dois solos, com exceção do FNAl em solo arenoso que mostrou uma tendência linear.

Em solo argiloso os maiores pesos nos grãos foram obtidos com o SFT na dose de 100 mg kg<sup>-1</sup> de P. Já para os fosfatos menos reativos ficou em 200 mg kg<sup>-1</sup>. Esses resultados demonstram que em solos com maior teor de argila onde há maior adsorção de P, são necessárias doses mais altas de fertilizantes fosfatados. Também segundo Silva *et al.*, (2009), a baixa solubilidade dos fosfatos naturais leva à necessidade de altas doses de P para atingir a máxima produção. Neste solo o maior peso foi obtido com a fonte de FNRAr na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> com 15,1 g por vaso, em seguida a fonte SFT na dose de 100 mg kg<sup>-1</sup> com 14,7 g por vaso. A fonte Supraphos apresentou resultado de 13,2 g por vaso e o FNAl 10,8 g por vaso na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> de P.

Para o solo arenoso o melhor resultado foi com a fonte SFT na dose de 50 e 100 mg kg<sup>-1</sup> com 14,4 e 13,2 g por vaso, seguido do FNRAr na dose de 50 mg kg<sup>-1</sup> com 13,8 g por vaso. No solo arenoso percebe-se que ao contrário do solo argiloso, quando as doses das fontes aumentam, as médias de peso diminuem (Figura 4 B), isso pode ser explicado pela compensação da planta em melhorar sua eficiência no uso do P em solos onde o nutriente está mais rapidamente disponível, devido a menor adsorção no solo.

Os maiores valores das médias obtido no solo argiloso, segundo Novais; Smyth, (1999), ocorre devido, provavelmente, ao maior fator capacidade de P desse solo, o que favorece uma maior remoção de Ca e P nos sítios de dissolução e, consequentemente, a dissolução dos fosfatos. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos *et al.*, (2005) com diferentes culturas cultivadas em Latossolo Vermelho Amarelo fertilizado com SFT; eles observaram que as plantas responderam significativamente à adubação de P, com superioridade para o SFT. Esses autores argumentam que as menores produções proporcionadas pelo uso do fosfato natural Arad são refletidas pelas solubilizações mais lentas desse fertilizante, não permitindo suprir a demanda das plantas e, consequentemente, promovendo restrição ao seu crescimento e desenvolvimento. Ono *et al.*, (2009) concluíram que no primeiro cultivo da soja em solo com textura argilosa, o SFT apresentou melhor desempenho para a PG quando comparado ao fosfato natural Arad.

Os resultados dos componentes de produção demonstram que nas condições desse estudo nos solos argilosos são necessárias maiores doses de P, mesmo nos fosfatos mais solúveis, pois há uma maior adsorção de P no solo. Em solos arenosos a dose de P pode ser menor pois existe menor adsorção de P no solo e consequentemente maior será a disponibilidade para as plantas.

**Tabela 16.** Massa seca de parte aérea (MSPA), Numero de grãos por vagem (NGV), Numero de vagens (NV) e Peso de 100 sementes (P100) influenciado pela fonte e dose de P em solo Argiloso.

Solo	Fonte	Dose (mg kg <sup>-1</sup> )	MSPA (g/vaso)	NGV (n/vagem)	NV (n/vaso)	P100 (g)
Argiloso	FNAI	0	6,43	2,00	7,70	9,00
	FNRAr		6,43	2,00	7,70	9,00
	SFT		6,43	2,00	7,70	9,00
	Supraphos		6,43	2,00	7,70	9,00
	FNAI	50	15,56 c	2,00	25,70 b	17,80
	FNRAr		19,06 bc	2,00	23,70 c	18,50
	SFT		26,00 a	2,00	31,00 a	18,00
	Supraphos		23,33 ab	2,00	30,00 ab	18,00
	FNAI	100	21,63 c	2,00	32,00 b	19,70
	FNRAr		29,23 ab	2,00	35,30 ab	17,20
	SFT		33,90 a	2,00	41,70 a	17,70
	Supraphos		28,26 c	2,00	33,30 b	17,80
	FNAI	200	24,03 c	2,00	27,30 c	18,00
	FNRAr		35,83 a	2,00	47,0 a	15,70
	SFT		34,46 ab	2,00	35,30 b	18,00
	Supraphos		30,30 b	2,00	38,00 b	18,20
<b>Teste F</b>						
<b>CV %</b>			<b>10,26</b>	<b>0</b>	<b>5,84</b>	<b>11,95</b>
<b>Fonte</b>			<b>29,14*</b>	<b>1<sup>ns</sup></b>	<b>2,12<sup>ns</sup></b>	<b>2,29<sup>ns</sup></b>
<b>Dose</b>			<b>295,36*</b>	<b>1<sup>ns</sup></b>	<b>195,53*</b>	<b>46,17*</b>
<b>Fonte x Dose</b>			<b>5,37*</b>	<b>1<sup>ns</sup></b>	<b>1,83*</b>	<b>2,11<sup>ns</sup></b>

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si na mesma coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.. \*significativo e **ns** - não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F. **FNAI**: Fosfato Natural de Alvorada, **FNRAr**: Fosfato Natural reativo da Argélia, **SFT**: Superfosfato triplo.

**Tabela 17.** Massa seca de parte aérea (MSPA), Numero de grãos por vagem (NGV), Numero de

vagens (NV) e Peso de 100 sementes (P100) influenciado pela fonte e dose de P em solo arenoso.

<b>Solo</b>	<b>Fonte</b>	<b>Dose (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>MSPA (g/vaso)</b>	<b>NGV (n)</b>	<b>NV (n/vaso)</b>	<b>P100 (g)</b>
	FNAI	0	10,40	2,00	13,60	15,40
	FNRAr		10,40	2,00	13,60	15,40
	SFT		10,40	2,00	13,60	15,40
	Supraphos		10,40	2,00	13,60	15,40
	FNAI	50	12,40 c	2,00	18,00 c	15,80
	FNRAr		29,10 b	2,00	35,33 ab	16,80
	SFT		32,93 a	2,00	47,66 a	15,10
	Supraphos		16,86 c	2,00	30,33 bc	18,30
<b>Arenoso</b>	FNAI	100	12,40 c	2,00	17,33 b	14,60
	FNRAr		23,10 b	2,00	30,00 ab	15,80
	SFT		30,73 a	2,00	41,00 a	15,10
	Supraphos		16,36 c	2,00	25,33 b	15,10
	FNAI	200	13,93 c	2,00	20,00 b	15,00
	FNRAr		25,93 a	2,00	35,33 a	17,00
	SFT		14,43 b	2,00	20,00 b	14,50
	Supraphos		18,23 a	2,00	31,66 ab	15,83
<b>Teste F</b>						
	<b>CV %</b>	<b>9,49</b>	<b>0</b>	<b>27,48</b>	<b>7,43</b>	
	<b>Fonte</b>	<b>52,46*</b>	<b>1<sup>ns</sup></b>	<b>10,43*</b>	<b>4,59<sup>ns</sup></b>	
	<b>Dose</b>	<b>134,62*</b>	<b>1<sup>ns</sup></b>	<b>20,55*</b>	<b>5,54*</b>	
	<b>Fonte x Dose</b>	<b>14,09*</b>	<b>1<sup>ns</sup></b>	<b>4,37*</b>	<b>2,24<sup>ns</sup></b>	

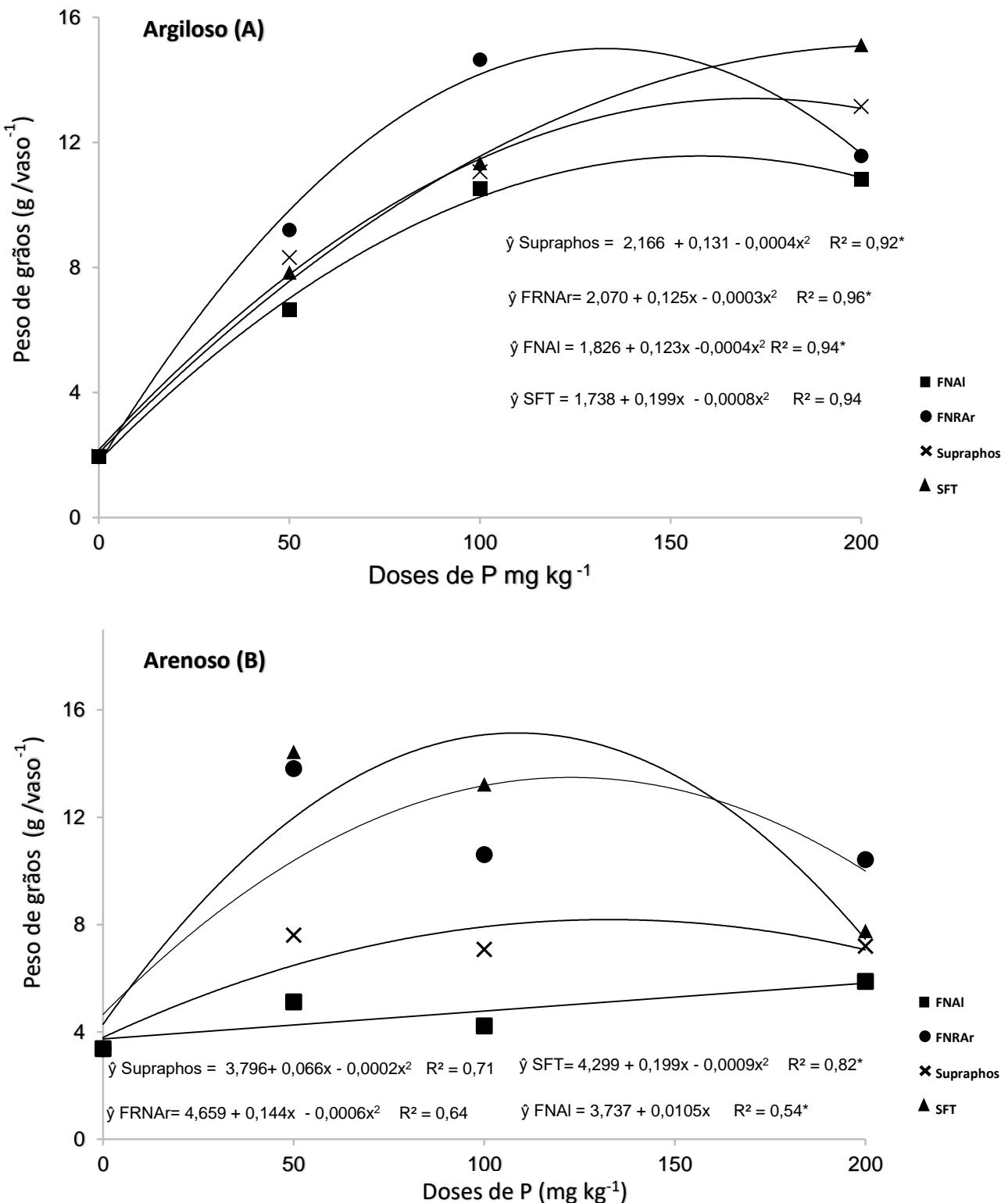
Médias seguidas por letras distintas diferem entre si na mesma coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. \* - significativo e ns - não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

**FNAI:** Fosfato Natural de Alvorada, **FNRAr:** Fosfato Natural reativo da Argélia, **SFT:** Superfosfato triplo.

**Tabela 18.** Equações de regressão ajustadas entre as variáveis analisadas massa seca de parte aérea (MSPA), número de vagens (NV), número de grãos por vagem (NGV) e peso de 100 sementes (P100) (Y), como variável dependente de doses de fosforo aplicadas (X) em solo argiloso e arenoso.

Solo	Fonte	Variável	Equação	R <sup>2</sup>	DME
Argiloso	FNAI	MSPA	$\hat{y} = 6,418 + 0,216X - 0,0006X^2$	0,91*	180
		NV	$\hat{y} = 8,148 + 0,401X - 0,0015X^2$	0,86*	134
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 9,427 + 0,179X - 0,0007X^2$	0,86*	128
	FNRAr	MSPA	$\hat{y} = 6,261 + 0,304X - 0,0008X^2$	0,99*	190
		NV	$\hat{y} = 7,703 + 0,358X - 0,0008X^2$	0,97*	224
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 9,912 + 0,154X - 0,0006X^2$	0,72*	128
	SFT	MSPA	$\hat{y} = 6,972 + 0,423X - 0,0014X^2$	0,96*	151
		NV	$\hat{y} = 7,948 + 0,549X - 0,0021X^2$	0,79*	130
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 11,402 + 0,119X - 0,0004X^2$	0,65*	149
	Supraphos	MSPA	$\hat{y} = 7,199 + 0,338X - 0,0010X^2$	0,95*	154
		NV	$\hat{y} = 9,167 + 0,402X - 0,0013X^2$	0,86*	155
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 9,768 + 0,151X - 0,0006X^2$	0,79*	126
Arenoso	FNAI	MSPA	$\hat{y} = 10,605 + 0,188X - 0,0005X^2$	0,66*	188
		NV	$\hat{y} = 14,185 + 0,034X - 0,0001X^2$	0,38*	170
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 15,519$	ns	ns
	FNRAr	MSPA	$\hat{y} = 12,825 + 0,241X - 0,0009X^2$	0,53*	134
		NV	$\hat{y} = 16,312 + 0,288X - 0,0010X^2$	0,57*	144
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 15,753$	ns	ns
	SFT	MSPA	$\hat{y} = 12,099 + 0,432X - 0,0021X^2$	0,87*	103
		NV	$\hat{y} = 16,785 + 0,598X - 0,0029X^2$	0,73*	103
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 15,546$	ns	ns
	Supraphos	MSPA	$\hat{y} = 11,048 + 0,097X - 0,0003X^2$	0,67*	162
		NV	$\hat{y} = 15,885 + 0,202X - 0,0006X^2$	0,36*	168
		NGV	$\hat{y} = 2,098$	ns	ns
		P100	$\hat{y} = 16,453$	ns	ns

DME- Dose máxima estimada (mg kg<sup>-1</sup>) pela equação de regressão. \* significativo e ns não significativo a 5% de probabilidade



**Figura 4.** Peso de grãos (PG) em função de doses e fontes de P, Fosfato natural Alvorada (FNAI), Fosfato natural reativo Argélia (FNAR), Supraphos e Superfosfato triplo (SFT) em solo argiloso (A) e arenoso (B). Os pontos são a média de três repetições. \*significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F.

## 5.5. ÍNDICE DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA E EQUIVALENTE SUPERFOSFATO TRIPLO

O Índice de Eficiência Agronômica (IEA) e o Equivalente Superfosfato Triplo (EqSPT) foram calculados com base no peso de grãos, utilizando a mesma dose de P para as fontes e adotou-se o superfosfato triplo (SFT) como fonte de referência. O IEA e EqSPT relativos aos dados de PG em função das fontes de P, doses e solos são apresentados na Tabela 19.

Os resultados mostraram que o fosfato natural reativo da Argélia (FNRAr) apresentou a mais alta eficiência, tanto em solo argiloso como em solo arenoso. Na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> de P, em solo argiloso houve uma diferença significativa entre os tratamentos, com o FNRAr com 37% a mais de eficiência agronômica que o SFT. Estes resultados concordam com obtidos por Lara *et al.*, (2016), ao demonstrarem que o FNRAr apresentou o mais alto IEA na comparação com o SFT em soja. Oliveira Junior; Prochnow; Klepker (2008) avaliaram a eficiência agronômica relativa do fosfato natural reativo Arad aplicado a lanço em solo argiloso e concluíram que foi superior ao SFT. A elevada eficiência FNRAr descrita por Gomes; Rein; Lobato (2008), que avaliaram a solubilidade de sete fosfatos naturais reativos extraídos com ácido cítrico e ácido fórmico, demonstraram que a capacidade preditiva dos índices de solubilidade dos fosfatos naturais reativos estão diretamente associados à eficiência agronômica em Latossolo nas condições de Cerrado. Dias *et al.*, (2012) demonstraram que o FNRAr incrementou a produção de MSPA, raízes e a altura do capim marandu (*Megathirsus sinensis*). Moreira; Malavolta, Moraes (2002), também obtiveram em Latossolo Amarelo resultados mais efetivos com o termofosfato Yoorin no cultivo da alfafa e centrossema, quando comparado a fosfatos naturais. Resultados diferentes foram obtidos por Fontoura *et al.*, (2010), que observaram o melhor resultado com SFT em culturas de inverno.

Os resultados desse estudo para IEA podem ser explicados, pelo fato do FNRAr ser uma fonte originária de rochas sedimentares, com maior solubilidade em ácido cítrico e em citrato neutro de amônio. Quanto maior for a solubilidade em ácidos orgânicos mais rápida deve ser a difusão do P no processo de absorção pelas plantas, bem como a adsorção pelo solo (MOREIRA; MALAVOLTA; MORAES, 2002 e LARA *et al.*, 2016). O pH dos solos com essa fonte de P ficaram entre 4,8 e 6,3. Testes tem mostrado que a eficiência dos fosfatos naturais reativos

como o FNRAr com algumas culturas anuais em várias regiões, aumenta em solos com pH em água inferior a 6,0, e é similar a dos fosfatos solúveis em água já no ano da aplicação (SOUZA; LOBATO, 2003).

A fonte Supraphos na dose 200 mg kg<sup>-1</sup> de P apresentou 16% superior no IEA ao do SFT, em solo argiloso (Tabela 19). Isso pode se explicar por essa fonte ter uma solubilidade de 18,9% em ácido cítrico. Nas doses 50 e 100 mg kg<sup>-1</sup> de P, o mesmo não ocorreu, sendo este inferior ao SFT. Em solo arenoso esta fonte apresentou IEA inferior as outras fontes testadas. Nas doses de 50 mg kg<sup>-1</sup> e 100 mg kg<sup>-1</sup> em solo argiloso os resultados obtidos mostraram que não houve diferença significativas entre as fontes e doses de fosforo e todas as fontes apresentaram eficiência agronômica abaixo do SFT.

Em solo arenoso para as doses de 50 mg kg<sup>-1</sup> e 100 mg kg<sup>-1</sup> de P ocorreram diferenças significativas entre as fontes de P, porém todas mostraram IEA inferiores ao SFT, apenas na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> o FNRAr apresentou um IEA 57%, quando comparado ao SFT. Essa diferença na eficiência em relação ao tipo de solo pode estar relacionada a com maior teor de argila e o maior teor de matéria orgânica no solo argiloso, sendo que, o processo de adsorção, pode acontecer preferencialmente segundo uma ordem de predomínio dos minerais de argilas 2:1, seguido pelas argilas 1:1 e óxidos de Fe e Al (MACHADO; SOUZA, 2012).

O fosfato natural de Alvorada (FNAI) demonstrou um IEA inferior em todas as doses e em ambos os solos (Tabela 19). Esse resultado pode ser devido a que o fosfato natural de Alvorada ser originário da apatita, cujo o P está na forma mais amorfa não estando prontamente disponível para as plantas. A baixa eficiência de fosfatos naturais de origem da apatita, deve-se à sua origem ígnea, ao alto grau de cristalização e à baixa solubilidade em ácido cítrico (KLIEMANN; LIMA, 2001). Também deve-se considerar que o fosfato Alvorada tem a menor solubilidade em ácido cítrico e citrato de amônio entre as fontes testadas, consequentemente o P não está rapidamente disponível para as plantas.

O EqSFT que representa a relação porcentual entre a dose de P na forma de SFT e a dose de P da fonte testada, que correspondem à mesma produção (GOEDERT; GOMES DE SOUSA; REIN, 1986). Os resultados mostraram que o FNRAr obteve na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup>, 22,2 % em solo argiloso e 24,7% em solo arenoso em equivalência ao SFT, o que não ocorreu nas doses de 50 e 100 mg kg<sup>-1</sup> de P. Para o Supraphos apenas em solo argiloso e na dose de 200mg kg<sup>-1</sup> com

11%. Esse resultado superior na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> pode ter ocorrido devido ao esgotamento natural de fontes solúveis de fósforo, além da acidificação do solo o que favorece a solubilização dos fosfatos naturais (MOREIRA; MALAVOLTA; MORAES, 2002).

Nas condições estudadas, os resultados demonstram para o IEA e EqSFT que o efeito residual do FRNAr tende a equiparar-se ao das fontes fosfatadas mais solúveis na dose de 200 mg kg<sup>-1</sup> de P. Havlin *et al.*, (2013) relataram que fosfatos naturais de alta reatividade, apresentam faixa de eficiência entre 80% e 100% à resposta ao SFT, aumentando essa resposta com o passar do tempo, mas isso é dependente do tipo de solo, tipo de cultura e manejo. Kliemann; Lima (2001) compararam fontes de fosfatos naturais como apatitas, bauxitas, termofosfatos e hiperfosfatos e concluíram que as apatitas apresentaram o menor IEA com 27%. Novais; Smyth (1999) demonstraram que os fosfatos naturais em solos mais argilosos favorecem o dreno de P dos sítios de dissolução, e consequentemente sua solubilidade.

Gomes; Rein; Lobato (2008) constataram que em de três anos ou mais, o efeito residual dos fosfatos naturais de menor solubilidade são equivalentes ou até pouco superiores ao SFT e aos fosfatos reativos de maior solubilidade. Esses resultados devem ser considerados quando se busca um adequado manejo das fontes fosfatadas, o que vai refletir na rentabilidade do produtor.

**Tabela 19.** Índice de eficiência agronômica (IEA) e equivalente superfosfato triplo (EqSFT) da soja, e solos com diferentes classes texturais, fontes [fosfato reativo natural da Argélia (FNRAr), Supraphos e Fosfato natural de Alvorada (FNAI)] e doses de P.

		IEA		EqSFT	
Fontes	Doses	Argiloso	Arenoso	Argiloso	Arenoso
		%			
<b>FNAI</b>		64,18	15,77 c	142,07	284,31a
<b>FNRAr</b>	<b>50</b>	80,69	94,30 a	120,40	104,91 c
<b>Supraphos</b>		87,19	38,30 b	117,28	190,63 b
<b>Média</b>		<b>77,35</b>	<b>49,45</b>	<b>126,58</b>	<b>193,28</b>
<b>CV</b>		<b>28,31</b>	<b>13,85</b>	<b>21,97</b>	<b>10,46</b>
<b>Fonte</b>		<b>0,88<sup>ns</sup></b>	<b>104,50*</b>	<b>0,70<sup>ns</sup></b>	<b>59,10*</b>
<b>FNAI</b>		67,39	8,62 c	140,12	315,22 a
<b>FNRAr</b>	<b>100</b>	73,93	73,41 a	130,04	125,19 c
<b>Supraphos</b>		71,70	37,57 b	135,80	187,94 b
<b>Média</b>		<b>71,00</b>	<b>39,86</b>	<b>135,32</b>	<b>209,45</b>
<b>CV</b>		<b>13,47</b>	<b>16,76</b>	<b>10,40</b>	<b>17,7</b>
<b>Fonte</b>		<b>0,36<sup>ns</sup></b>	<b>78,02*</b>	<b>0,39<sup>ns</sup></b>	<b>26,04*</b>
<b>FNAI</b>		92,93 b	56,24 c	108,19 a	134,10 a
<b>FNRAr</b>	<b>200</b>	136,98 a	157,05 a	77,77 b	75,93 b
<b>Supraphos</b>		116,44 b	85,21 b	88,30 b	110,93 a
<b>Média</b>		<b>115,45</b>	<b>99,5</b>	<b>91,42</b>	<b>106,98</b>
<b>CV</b>		<b>12,48</b>	<b>17,7</b>	<b>11,52</b>	<b>11,70</b>
<b>Fonte</b>		<b>7,24*</b>	<b>26,06*</b>	<b>6,74*</b>	<b>16,65*</b>

**Solo argiloso** com teor de argila de 840 g kg<sup>-1</sup>

**Solo arenoso** com teor de argila de 88 g kg<sup>-1</sup>

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si na mesma coluna a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey . \*significativo, <sup>ns</sup> não significativo teste F (p>0,05).

**FNAI:** Fosfato Natural de Alvorada, **FNRAr:** Fosfato Natural reativo da Argélia, **SFT:** Superfosfato triplo.

## 6. CONCLUSÕES

Os fosfatos naturais e o Supraphos apresentam a maior taxa de recuperação, foram superiores ao SFT com o método Mehlich1 nos dois solos. Já no método Resina o Supraphos apresentou teores superiores aos fosfatos naturais e o SFT.

Os extractores Mehlich1 e Resina apresentaram alto correlação e foram eficientes na avaliação do fósforo disponível.

As variações de pH causadas pelas fontes estudas ficaram em 4,5 e 6,5 e não houve prejuízo em relação a absorção de nutrientes.

A fonte Supraphos elevou significativamente o teor Ca no solo em todas as doses em solo argiloso, enquanto em solo arenoso não houve diferença entre as fontes e doses.

As doses e fontes de P não afetaram a absorção de Zn pela cultura da soja

Para todas as fontes, as doses de P proporcionaram um aumento significativo na produção de MSPA, NV, PG e o teor de P, em ambos os solos argiloso e arenoso.

Os maiores IEA e de EqSFT foram obtidos com o FNRAr em ambos os solos e o Supraphos no solo argiloso.

Em solo argiloso são necessárias maiores doses de P, mesmo com fosfatos mais solúveis, do que nos arenosos, devido a maior fixação de P no solo argiloso.

## 7. REFERÊNCIAS

- ALCARDE, J. C., GUIDOLIN, J. A., LOPES, A. S. Os Adubos E a Eficiência Das. **Boletim técnico 3 - ANDA**, v. 1, n. 3, p. 1–43, 1998.
- ASHER, C. J.; LONERAGAN, J. F. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. **Soil Science**, v. 103, n. 4, p. 225–233, 1967.
- BAKER, A. et al. **Replace, reuse, recycle: Improving the sustainable use of phosphorus by plants***Journal of Experimental Botany*, 2015.
- BARBER, S. A. A. Diffusion and mass-flow concep of soil nutriente availability. **Soil Science**, v. 93, n. 1, p. 39–49, 1962.
- BARRETO, N. D. S.; DUDA, G. P.; OLIVEIRA, C. J.; ALMAIDA JÚNIOR, A. B.; MENDES, A. M. S. Uso de fosfatos com diferentes solubilidades no conteúdo de macronutrientes da cultura do milho em dois ciclos de cultivo. **XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, n. 1, p. 1–5, 2007.
- BENTO, R. U. et al. Eficiência agronômica e produtividade soja em resposta à fontes e doses de fósforo. **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, n. 35, p. 4, 2015.
- BIELESKI, R. L. Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. **Plant Physiology**, p. 225–252, 1973.
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; WELTER, S.; ALMEIDA, R. G.O.; GIASSON, E. Simultaneous Extraction of Phosphorus, Potassium, Calcium and Magnesium from Soils and Potassium Recommendations for Crops in Southern Brazil. **Pedosphere**, v. 21, n. 3, p. 365–372, 2011.
- BOUAIN, N.; SHAHZAD, Z.; ROUACHED, A.; KHAN, G. A.; BERTHOMIEU, P.; ABDELLY, C.; POIRIER, Y.; ROUACHED, H. Phosphate and zinc transport and signalling in plants : toward a better understanding of their homeostasis interaction. **Experimental Botany**, v. 65, n. 20, p. 5725–5741, 2014.
- BRAGA, G., P., PROCHONOW, L. I. **Eficiência de fosfatos com solubilidade variável em água em solos com capacidade de fixação de fósforo induzida.** [s.l.] 2006. 82p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2006.
- BYRNE, M., STONE, L., MILLAR, M. A. Assessing genetic risk in revegetation. **Journal of Applied Ecology**, v. 1, n. 48, p. 1365–1373, 2011.
- CARNEIRO, L. F.; NETO, A. E. F.; DE RESENDE, A. V.; CURI, N.; SANTOS, J. Z. L.; DO LAGO, F. J. Fontes, doses e modos de aplicação de fósforo na interação fósforo-

- zinc em milho. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 32, n. 4, p. 1133–1141, 2008.
- CONAB. **Perspectivas para agropecuária**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>.
- CONDRON, L. M.; GOH, K. M.; NEWMAN, R. H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, v. 36, n. 2, p. 199–207, 1985.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009.
- CORRÊA, R. M.; DO NASCIMENTO, C. W. A.; SÁ SOUZA, S. K. FREIRE, F. J.; DA SILVA, G. B. Gafsa rock phosphate and triple superphosphate for dry matter production and P uptake by corn. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 2, p. 159–164, 2005.
- DA SILVA, F. N., NETO, A. E. F., CARNEIRO, L. F., SOUZA MAGALHÃES, C. A., CARNEIRO, D. N. M. Crescimento e produção de grãos da soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 33, n. 5, p. 1220–1227, 2009.
- DAI, J.; WANG, W.; WU, W.; GAO, J.; DONG, C. Adsorption and desorption of  $\text{Cu}^{2+}$  on paddy soil aggregates pretreated with different levels of phosphate. **Journal of Environmental Sciences**, v. 55, p. 311–320, 2016.
- DE ARAUJO, F. F. Disponibilização de fósforo, correção do solo, teores foliares e rendimento de milho após a incorporação de fosfatos e lodo de curtume natural e compostado. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 355–360, 2011.
- DE MARIA, I. C.; ROSSETTO, R.; AMBBROSANO, E. J.; DE CATRO, O. M.; NEPTUNE, A. M. L. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio no movimento de cátions em colunas de solo. **Scientia Agricola**, v. 50, n. 1, p. 87–98, 1993.
- EMBRAPA. Manual de métodos de Análise de solo. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**, v. 1, n. 3 ed, p. 573, 2017.
- FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A.; CASTRO, C. Response of soybean to phosphorus fertilization in Brazilian Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, n. 22, p. 2716–2723, 2011.
- FAO. **World Food and Agriculture - Statistical Pocketbook**, 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/documents/card/en/c/CA1796EN>>
- FIXEN, P. E. Reservas mundiais de nutrientes dos fertilizantes. **Informações**

- Agronômicas**, n. 126, p. 8–14, 2009.
- FONTOURA, S. M. V. . V.; R. C.B.; BAYER, C.; ERNANI P. R.; MORAES, R. P. Eficiência Técnica De Fertilizantes Fosfatados. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 1, p. 1907–1914, 2010.
- FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; WRUCK, F. J.; SKORUOA, L. A.; WINK, N. J.; GUIOLPI, I. J. C.; CAUMO, A. L.; HATORI, T. Integração Lavoura-Pecuária: Alternativa para diversificação e redução do impacto ambiental do sistema produtivo no Vale do Rio Xingu. **Embrapa Soja**, Circular Técnica 77. p. 20, 2010.
- FREITAS, M. C. M. A cultura da soja no Brasil: O crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer**, v. 7, n. 12, p. 1–38, 2011.
- GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 2003.
- GAUDE, N. et al. Phospholipase C5 (NPC5) is involved in galactolipid accumulation during phosphate limitation in leaves of *Arabidopsis*. **Plant Journal**, v. 56, n. 1, p. 28–39, 2008.
- GOEDERT, W. J., SOUSA, D. M. G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. **SIMPOSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA**, p. 255–290, 1985.
- GOEDERT, W. J.; LOBATO, E. Avaliação agronômica de fosfatos em solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 97–102, 1984.
- GOEDERT, W. J.; REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados não tradicionais. **Documentos Embrapa - CPAC**, v. 24, p. 21, 1986.
- GOEDERT, W.L.; GOMES DE SOUSA, D. M.; REIN, T. A. Princípios metodológicos para avaliação agronômica de fontes de fósforo. **Embrapa CPAC -Documentos**, v. 22, p. 23, 1986.
- GOEDERT, W. J. Management of the cerrado soils of Brazil. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 3, p. 405–428, 1983.
- GOMES, D. M.G., REIN, T.A., LOBATO, E. **Solubilidade e Eficiência Agronômica de Fosfatos Naturais Reativos Avaliados com a Cultura da Soja em um Latossolo de Cerrado**. IX Simpósio Nacional do Cerrado e II Simpósio Internacional Savanas Tropicais. **Anais...Brasilia**: 2008
- GONÇALVES, J. S.; FERREIRA, C. R. R. P. T.; SOUZA, S. A. M. Produção Nacional de Fertilizantes, Processo de Desconcentração Regional e Maior Dependência

- Externa. **Informações Econômicas**, v. 38, n. 8, p. 79–90, 2008.
- GONÇALVES DIAS, D. et al. Rendimento Forrageiro Do Capim Marandu Submetido a Diferentes Fontes De Fósforo. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 10, n. 4, p. 345, 2012.
- GUO, B. et al. Functional analysis of the *Arabidopsis* PHT4 family of intracellular phosphate transporters. **New Phytologist**, 2008.
- HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7. ed. New Jersey: Pearson, 2005.
- HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers**. 8. ed. [s.l.] Prentice Hall, 2013.
- HELDT, H. W. et al. Diversity of Specificity and Function of Phosphate Translocators in Various Plastids. **Plant Physiology**, p. 341–343, jul. 1991.
- HUANG, C., BARKER, S. J., LANGRIDGE, P., SMITH, F. W., GRAHAM, R. D. Zinc Deficiency Up-Regulates Expression of High-Affinity Phosphate Transporter Genes in Both Phosphate- Sufficient and -Deficient Barley Roots 1. **Plant Physiology**, v. 124, p. 415–422, out. 2000.
- HUGHES, J. M.; RAKOVAN, J. The crystal structure of apatite , Ca5 (PO4)3 (F,OH ,Cl). **Mineralogy and Geochemistry**, v. 5, n. 48, p. 1–12, 2002.
- IBRAM. Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. **IBRAM: Instituto Brasileiro de Mineração**, v. 53, n. 7, p. 68, 2012.
- JÚNIOR, A. O., PROCHONOW, L. I., KLEPER, D. Soybean yield in response to application of phosphate rock associated with triple superphosphate associado ao superfosfato triplo. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 3, p. 376–385, jun. 2011.
- KLIEMANN, H. J.; LIMA, D. V. Eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 31, n. 2, p. 111–119, 2001.
- KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 2, 1999.
- KURIHARA, C. H.; VENEGAS, V. H.A.; NEVES, J. C.L.; DE NOVAIS, R.F.; STAUT, L. A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 412–419, 2013.
- LANA, M. C.; LUCHESE, A. V.; BRACCINI, A. L. Disponibilidade de nutrientes pelo

- fertilizante de liberação controlada Osmocote e composição do substrato para produção de mudas de *Eucalyptus saligna*. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 9, n. 1, p. 68–81, 2010.
- LANA, R. M. Q., ZANÃO JUNIOR, L. A., LUZ J. M.Q., SILVA, J. C. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de Cerrado. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 3, p. 525–528, 2004.
- LARA, I.C.V.; MOREIRA, A.; CABRERA, R.A.D.; MORAES, L. A. C. Eficiência agronômica de fontes e doses de fósforo no cultivo da soja em solos com diferentes classes texturais. **XII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja**, 2016.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 151–210, 1967.
- LAUER, M. J.; BLEVINS, D. G.; SIERZPUTOWSKA-GRACZ, H. 31P-Nuclear Magnetic Resonance Determination of Phosphate Compartmentation in Leaves of Reproductive Soybeans ( *Glycine max L.* ) as Affected by Phosphate Nutrition '. **Plant Physiology**, p. 1331–1336, out. 1989.
- LEMOS, M. L. F., GUIMARÃES, D. D., DA SILVA MAIA, G. B., AMARAL, G. F. Agregação de valor na cadeia da soja. **Agroindústria BNDES Setorial**, v. 46, p. 167–217, 2017.
- LIMA, I. M. A.; DE AQUINO, B. F.; NASCIMENTO, B. L. M. Estudo da eficiência de diferentes fontes de fosfato na cultura do sorgo. **Cultura Agronômica**, v. 25, n. 1, p. 25–38, 2016.
- LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da Região Centro- Oeste. In: OLIVEIRA A. J., LORENÇO E., G. W. J. (Ed.). . **Adubação fosfatada no Brasil**. 1. ed. Brasilia - DF: Embrapa, 1982. p. 201–239.
- LOPES, A. S., SILVA, M. C., & GUILHERME, L. R. G. Acidez do solo e calagem. **Boletim Técnico N° 1 - ANDA**, n. 3, p. 22, 1990.
- LOTT, JOHN N.A., BOJARSKI, MARLA, KOLASA, JUREK, BATTEN, GRAEME D., CAMPBELL, L. C. A review of the phosphorus content of dry cereal and legume crops of the world. **International journal of agricultural resources, governance and ecology**, v. 8, n. 5–6, p. 351–370, 2009.
- MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 1, p. 70–76, 2011.
- MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes

- texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, v. 28, n. SUPPL. 1, p. 1–7, 2012.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo**. São Paulo: Agronomica Ceres, 1976.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral das plantas**. [s.l.: s.n.]. v. 1
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.
- MARIN, R. S. F.; BAHRY, C. A.; NARDINO, M.; ZIMMER, P. D. Efeito da adubação fosfatada na produção de sementes de soja. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 265–274, 2015.
- MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 9, n. 6, p. 477–492, 1 jan. 1978.
- MELAMED, R., GASPAR, J.C. MIEKELEY, N. Pó-de-rocha como fertilizante alternativo para sistemas de produção sustentáveis em solos tropicais. In: LAPIDO-LOUREIRO, F.E. MELAMED, R. FIGUEIREDO NETO, J. (Ed.). **Fertilizantes agroindústria e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. p. 385–395.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, L. A. C. M. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 10, p. 1459–1466, 2002.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Fontes, doses e extractores de fósforo em alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 22, p. 1519–1527, 2001.
- MUMBACH, G. L. et al. Quantificação de fósforo por Mehlich1, Mehlich3 e Resina Trocadora de Ânions em solos com diferentes teores de argila. **Revista Ceres**, v. 65, n. 6, p. 546–554, 2018.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T. J. **Fosforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999a.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. **Universidade Federal de Viçosa**, p. 399 p, 1999b.

- NOVAIS; R.F.; NEVES; J.C.L.; BARROS; N.F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A.J. DE; GARRIDO, W.E.; ARAÚJO, J.D. DE; LOURENÇO, S. (Ed.). . **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. 1. ed. Brasilia: Embrapa-SEA, 1991. p. 189–253.
- NOVO, C. P.; COUSO, A. B; PERIAGO, E. L.; CALVIÑO, D. F.; ESTEVÉZ, M. A. Zinc adsorption in acid soils. Influence of phosphate. **Geoderma**, v. 162, n. 3–4, p. 358–364, 2011.
- NUSSAUME, L.; KANNO, S.; JAVOT, H.; MARIN, E.; POCHON, N.; AYADI, A.; NAKANISHI, T. M.; THIBAUD, M. C. Phosphate Import in Plants: Focus on the PHT1 Transporters. **Frontiers in plant science**, v. 2, n. November, p. 83, 2011.
- O'HARA, G. W. Nutritional constraints on root nodule bacteria affecting symbiotic nitrogen fixation: A review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 41, n. 3, p. 417–433, 2001.
- OELKERS, E. H.; VALSMI-JONES, E. Phosphate mineral reactivity and global sustainability. **Elements**, v. 4, n. Abril, p. 83–88, 2008.
- OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. C.; ERNANI, P. R.; BOTT, G.; BRUNETTO, G. Capacidade de predição da disponibilidade de fósforo em solo com aplicação de fosfato solúvel e natural. **Científica**, p. 413–419, 2015.
- OLIVEIRA, R. L. L.; ALVES, J. D. N.; ABADE, M. T. R.; SALDANHA, E. C. M.; OKUMURA, R. S. Resposta da soja a adubação fosfatada em latossolo amarelo no nordeste paraense. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer**, v. 10, n. 18, p. 2681–2689, 2014.
- OLIVEIRA JUNIOR, A.; PROCHNOW, L. I.; KLEPKER, D. Eficiência agronômica de fosfato natural reativo na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 43, n. 5, p. 623–631, 2008.
- ONO, F. B.; MONTAGNA, J.; NOVELINO, J. O.; SERAFIM, M. E.; DALLASTA, D. C.; GARBIATE, M. V. Eficiência agronômica de superfosfato triplo e fosfato natural de arad em cultivos sucessivos de soja e milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 3, p. 727–734, 2009.
- PANTANO, G. et al. Sustentabilidade no uso do Fóforo: uma questão de segurança hidrica e alimentar. **Química Nova**, v. 39, n. 6, p. 732–740, 2016.
- PEDAS, P.; HUSTED, S.; SKYTTE, K.; SCHJOERRING, J. K. Elevated phosphorus impedes manganese acquisition by barley plants. **Plant Science**, v. 2, n. Agosto, p. 1–12, 2011.

- PIMENTEL-GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2009.
- PÍPOLO, A. E., HUNGRIA, M., FRANCHINI, J. C., BALBINOT JUNIOR, A. A., DEBIASI, H., MANDARINO, J. M. G. Comunicado 86 Técnico. p. 1–15, 2015.
- PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; CUNHA, J. F. Balanço de nutrientes na agricultura brasileira. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI. 2. ed. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 362.
- PROCHNOW, L. I. Avaliação e manejo da acidez do solo. **Informações Agronômicas**, v. 146, p. 5–9, 2014.
- RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J. A; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion- exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 17, n. 5, p. 547–566, 1986.
- RAO, M.; TERRY, N. Leaf Phosphate Status, Photosynthesis, and Carbon Partitioning in Sugar Beet (Changes in Growth, Gas Exchange, and Calvin Cycle Enzymes). **Plant Physiology**, p. 814–819, 1989.
- RAUSCH, C.; BUCHER, M. **Molecular mechanisms of phosphate transport in plants**. *Planta*, 2002.
- REIS, N. P. **Perspectivas para o fósforo**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO SETOR DE FERTILIZANTES. **Anais**...São Paulo: ANDA, 2002
- RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E. Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do Cerrado. **Documentos Embrapa - Cerrados**, v. Documento, n. 4, p. 32, dez. 2007.
- RESENDE, A. V.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURI, N.; LAGO, F. J. Resposta do milho a fontes e modos de aplicação de fósforo durante três cultivos sucessivos em solo da região do cerrado. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 30, n. 3, p. 458–466, 2006.
- RESENDE, A. V. R.; FURTINI NETO, A. E.; ALVES, V. M. C.; MUNIZ, J. A.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KUMPARA, D. I.; SANTOS, J. Z. L.; CARNEIRO, L. C. Resposta do milho a fontes e modos de aplicação de fósforo durante três cultivos sucessivos em solo da região do Cerrado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 3, p. 458–466, 2008.
- RICHARDSON, A. E. Soil microorganisms and phosphorus availability. In: PANKUSRST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R.; GRACE, P. R. (Ed.). **Soil**

- Biota: Management in Sustainable Farming Systems.** Melbourne: CSIRO, 1994. p. 50–62.
- RICHARDSON, A. E. Prospects for using soil microorganisms to improve the acquisition of phosphorus by plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 28, p. 897–906, 2001.
- RIEDER, J. H. **Destinação racional dos jazimentos fosfáticos nacionais.** In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA. **Anais...** São Paulo: IBRAFOS, 1986
- ROBERTS, T. L.; JOHNSTON, A. E. Phosphorus use efficiency and management in agriculture. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 275–281, 2015.
- ROCHA, A. T.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, D. W.A.; RIBEIRO, M. R. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 178–184, 2005.
- ROSOLEM, C. A.; TAVARES, C. A. Sintomas de deficiência tardia de fósforo em soja. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, n. 2, p. 385–389, 2006.
- ROTTERDAM, A. M. D.; VAN BUSSINK, D. W.; TEMMINGHOFF, E. J. M.; RIEMSDIJK, W. H. Predicting the potential of soils to supply phosphorus by integrating soil chemical processes and standard soil tests. **Geoderma**, v. 189–190, p. 617–626, 2012.
- RUIZ, H. A.; MIRANDA, J.; CONCEIÇÃO, J. C. S. Contribuição dos mecanismos de fluxo de massa e de difusão para o suprimento de K, Ca e Mg a plantas de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 1015–1018, 1999.
- RUPA, T. R. . et al. Effects of farmyard manure and phosphorus on zinc transformations and phyto-availability in two alfisols of India. **Bioresource Technology**, v. 87, n. 3, p. 279–288, 2003.
- SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: **The role of phosphorus in agriculture.** Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1980. p. 263–310.
- SANTOS, A. C., OLIVEIRA, B. A., GOMES, I. F., GROFF, A. M. **Fatores e técnicas de produção e sua influência na produtividade e qualidade da soja.** XI Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. **Anais...** Campo Mourão - PR: 2012
- SANTOS, D. R., GATIBONI, L. C., KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto.

- Ciencia Rural**, v. 38, n. 2, p. 576–586, 2008.
- SANTOS, E.A., KLIEMANN, H. J. Disponibilidade de fósforo de fosfatos naturais em solos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 3, p. 139–146, 2005.
- SANTOS, E. DE A.; KLIEMANN, J. H. Disponibilidade De Fósforo De Fosfatos Naturais Em Solos De Cerrado E Sua Avaliação Por Extratores Químicos. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 3, p. 139–146, 2005.
- SARMENTO, P.; C.; CORSI, M.; CAMPOS, F. P. Resposta da alfafa a fontes de fósforo associadas ao gesso e à calagem. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 381–390, 2001.
- SCHACHTMAN, D. P.; REID, R. J.; AYLING, S. M. Phosphorus uptake by plants : from soil to cell. **Plant Physiology**, v. 116, p. 447–453, 1998.
- SEAB. Análise da Conjuntura Agropecuária DERAL - Departamento de Economia Rural. **DERAL - Departamento de Economia Rural Trigo**, n. 41, p. 11, 2017.
- SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, 2011.
- SHEN, Y. et al. Phytochrome A Mediates Rapid Red Light – Induced Phosphorylation of Arabidopsis FAR-RED ELONGATED HYPOCOTYL1 in a Low Fluence Response. **The Plant Cell**, v. 21, n. February, p. 494–506, 2009.
- SHIN, H. et al. Phosphate transport in Arabidopsis: Pht1;1 and Pht1;4 play a major role in phosphate acquisition from both low- and high-phosphate environments. **Plant Journal**, 2004.
- SHUKLA, D.; RINEHART, C. A.; SAHI, S. V. Comprehensive study of excess phosphate response reveals ethylene mediated signaling that negatively regulates plant growth and development. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 3074, 2017.
- SILVA, F. C. (ED.). **Manual de análises químicas de solos , plantas e fertilizantes**. 2<sup>a</sup> ed. Brasilia - DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.
- SMITH, F. W., JACKSON, W. A., BERG, P. J. . . Internal Phosphorus Flows During Development of Phosphorus Stress in *Stylosanthes hamata*. **Australian Journal of Plant Physiology**, v. 4, n. 17, p. 451–464, 1990.
- SOUSA, D. M. G. DE, LOBATO, E.; REIN, T. A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G., LOBATO, E. (Ed.). . **Cerrado: correção do solo e adubação**. 1. ed. Brasilia - DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 147–168.
- SOUSA, D. M. G. DE, NUNES, R. S., REIN, T.A., SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Manejo da Adubação Fosfatada para Culturas Anuais no Cerrado** Circular Técnica -

- Embrapa:** Circular Técnica. Planaltina - DF: [s.n.].
- SOUSA, D. M. G. DE; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação.** 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004.
- SOUSA, D. M. G. DE; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. **Informações Agronômicas**, v. 102, n. 1, p. 1–16, 2003.
- SOUZA, A. E., FONSECA, D. S. **FosfatoSérie Estatística e Economia Mineral - Mineração para o Agronegócio** Agencia Nacional de Mineração, , 2009. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>>
- SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, v. 40, n. 3, p. 513–519, 2010.
- SUZUKI, Y.; MAKINO, A.; MAE, T. An efficient method for extraction of RNA from rice leaves at different ages using benzyl chloride. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 360, p. 1575–1579, 2001.
- TEIXEIRA, P. C., CAMPOS, D. V. B., BIANCHI, S. R., PÉREZ, D. V., SALDANHA, M. F. C. Cátions Trocáveis. In: TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. (Ed.). . **Manual de Métodos de Análise de Solo.** 3<sup>a</sup> ed. Brasilia - DF: Embrapa Solos, 2017. p. 210–233.
- TEIXEIRA, P. C., CAMPOS, D. V. B., SALDANHA, M. F. C. pH do solo. In: TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. (Ed.). . **Manual de Métodos de Análise de Solo.** 3<sup>a</sup> edição ed. Brasilia - DF: Embrapa Solos, 2017. p. 200–203.
- TUNER B.L.; RICHARDSON, A. E.; MULLANEY, E. J. **Inositol phosphates: Linking agriculture and the environment.** Wallingford: Biddles, 2007.
- TUREK S. L.; BUCKWALTER, J. A. **Orthopaedics: Principles and their applications.** 5. ed. [s.l.] LWW, 1994.
- USGS. United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. p. 200, 2019.
- VAN RAIJ, B. Condições mínimas de eficiência para fosfatos alternativos ao superfosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 235–239, out. 1986.
- VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1991.
- VAN RAIJ, B. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraído com

- resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. VAN.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H., QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. 1. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p. 285.
- VAUCLARE, P., BLIGNY, R., GOUT, E., WIDEMER, F. Research letter. **FEMS Microbiology Letters**, v. 343, n. 1, p. 49–56, jun. 2013.
- VERSAW, W. K.; HARRISON, M. J. A chloroplast phosphate transporter, PHT2;1, influences allocation of phosphate within the plant and phosphate-starvation responses. **Plant Cell**, 2002.
- VETTORI, L. Boletim Técnico n.º 7. **Ministerio da Agricultura**, v. 1, n. 1, p. 25, 1969.
- VILAR, C. C.; VILAR, F. C. M. Comportamento do fósforo em solo e planta. **Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 37–44, 2013.
- VOISIN, A. **Adubos e novas leis científicas de sua aplicacao**. São Paulo: Mestre Jou, 1973.
- XUE, H.; CHEN, X.; LI, G. Involvement of phospholipid signaling in plant growth and hormone effects. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 1, n. 10, p. 483–489, 2007.
- ZHANG, T. Q.; MACKENZIE, A. F.; LIANG, B. C.; DRURY, C. F. Soil test phosphorus and phosphorus fractions with long-term phosphorus addition and depletion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 2, p. 519, 2014.
- ZOZ, T. L.; LANA, M. C.; STEINER, F.; FRANDAOLOSO, J. F.; FEY, R. Influência do pH do solo e de fertilizantes fosfatados sobre a adsorção de fósforo em latossolo vermelho. **Synergismus scyentifica**, v. 4, n. 1, p. 1–3, 2009.