

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM BRAQUIÁRIA
EM ROTAÇÃO COM SOJA**

DANILO SILVA ALMEIDA

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP
Julho – 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM BRAQUIÁRIA
EM ROTAÇÃO COM SOJA**

DANILO SILVA ALMEIDA

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp – Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP
Julho – 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Almeida, Danilo Silva, 1987-

A447d Disponibilidade de fósforo em solo cultivado com braquiária em rotação com soja / Danilo Silva Almeida. - Botucatu : [s.n.], 2014
xiv, 80 f. : tabs., grafs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014

Orientador: Ciro Antonio Rosolem

Inclui bibliografia

1. *Brachiaria ruziziensis*. 2. Fósforo - Biodisponibilidade. 3. Rotação de cultivos. 4. Solos - Teor de fósforo. I. Rosolem, Ciro Antonio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

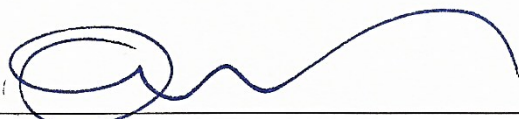
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO EM SOLO CULTIVADO COM
BRAQUIÁRIA EM ROTAÇÃO COM SOJA"

ALUNO: DANILO SILVA ALMEIDA

ORIENTADOR: PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM

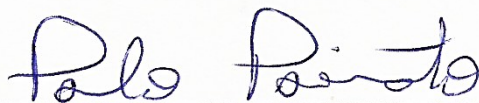
APROVADO PELA COMISSÃO EXAMINADORA:



PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM



PROF. DR. LUIS ~~IGNACIO~~ PROCHNOW



PROF. DR. PAULO SÉRGIO PAVINATO

Data da Realização: 24 de julho de 2014.

DEDICO

À minha mãe, Luisa Aparecida da Silva, que me ensinou que o conhecimento é o bem mais valioso.

À minha irmã, Daniella Silva Almeida, meu maior orgulho.

À meu pai, José Rosa de Almeida, por todo o apoio em minhas decisões.

À quem amei e à quem irei amar ainda mais.

AGRADECIMENTOS

A todas as amizades que se criaram durante o meu mestrado e que tornaram possível a realização e o sucesso de mais essa fase em minha vida.

À minha mãe, e minha irmã, que sempre compreenderam a minha ausência, mas que sempre estiveram presentes, seja qual foi a distância entre nós. À meu pai, meu maior investidor, sem seu apoio esse sonho não seria realidade.

À toda minha família de Minas Gerais e da rua Araldo Armani, sem a torcida de vocês não existe vitória. À dona Jê, a maior guerreira, capaz de vencer qualquer desafio por si e por quem ama.

Ao meu orientador, Ciro Antonio Rosolem, por toda a atenção, suporte, e confiança em meu trabalho. Sou eternamente grato por trabalhar com a liberdade de escolha, com a vantagem de aprender, e com o objetivo de fazer o que é certo.

Aos meus amigos, Bruno Aires, Maurício Mancuso, Jayme Ferrari, Claudio Costa, pelo companheirismo e por tornarem meu trabalho em uma diversão. Ao João Paulo e Antonio Carlos Carmeis, que nunca negaram esforços, sem o apoio de vocês seria impossível finalizar meu trabalho. Ao Juan Piero, pela amizade, sinceridade, sabedoria, e disposição para atender às minhas dúvidas. Ao Kassiano Rocha, pela amizade e atenção para todos os assuntos. À Rubiana Rossi, que sempre esteve por perto e zelando por minha pesquisa.

Ao Caio Vilela e Thiago Catuchi, pela dedicação nos trabalhos mais difíceis e pela compreensão na divisão dos trabalhos.

Aos alunos de graduação, Kibarra, Pink, Jussara, Cartuxo, e Xicuta, pela dedicação e vontade de aprender.

A todos os pós-graduandos da Faculdade de Ciências Agrônômicas, que torcem e lutam pela vitória de seus colegas.

Ao Prof. Carlos Alexandre Costa Crusciol, por não exitar o apoio à minha pesquisa.

Ao Dr. Chad Penn, que abriu as portas de um novo mundo e por sua ansiedade de alcançar novos resultados. Ao Laércio Pivetta, Gustavo Castoldi, e Mariângela Freiburger

por todas as providências em minha viagem à Oklahoma. Ao Samuel Zoca, por garantir o sucesso dessa viagem e à Thatiane Kievitsbosch pela companhia brasileira e diversão. Ao Reeves Murray, James Mckinley, Cory Anderson, e Adam Boyd, pelo acolhimento e por tornarem simples minha adaptação à uma nova cultura.

À professora Priscila Lacerda, por todas as conversas em aula, que foram até capaz de ensinar inglês para mim.

À professora Martha Maria Mischán, por toda a ajuda na análise dos resultados dessa dissertação.

Ao Dorival Pires de Arruda, sem a sua ajuda seria impossível alcançar bons resultados.

Ao Célio Mariano, Casimiro Alves, e demais funcionários do departamento de Agricultura e Melhoramento Vegetal, pelo compromisso e disposição em seus trabalhos.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pela concessão de bolsa de Mestrado.

MUITO OBRIGADO!

*“Tudo o que temos de decidir é
o que fazer com o tempo que nos é dado.”*

(J. R. R. Tolkien)

*“I tell you folks
It’s harder than it looks*

*It’s a long way to the top
if you wanna rock ‘n’ roll”*

(A. Young, M. Young, e B. Scott)

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	XIV
1 RESUMO folha 1 em arábico colocar número	1
2 SUMMARY	2
3 INTRODUÇÃO	3
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1 Fertilizantes fosfatados	5
4.2 Formas de fósforo no solo	7
4.2.1 P inorgânico	7
4.2.2 P orgânico	9
4.3 Fracionamento do fósforo	10
4.4 Biodisponibilidade de fósforo	12
5 MATERIAIS E MÉTODOS	17
5.1 Caracterização da área experimental	17
5.2 Delineamento e histórico da área experimental	18
5.3 Condução do experimento no ano safra 2012/13	19
5.3.1 Cultivo da braquiária – entressafra de 2012	19
5.3.2 Cultivo da soja – safra 2012/13	20
5.3.3 Avaliações no solo	21
5.3.3.1 Fracionamento do fósforo	21
5.3.5 Avaliações nas plantas – safra 2012/13	22
5.4 Condução do Experimento no ano safra 2013/14	23
5.4.1 Cultivo da braquiária – entressafra de 2013	23
5.4.2 Cultivo da soja – safra 2013/14	24
5.4.3 Avaliações nas plantas – safra 2013/14	24
5.5 Análise dos resultados	25
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6.1 Cultura da braquiária – entressafra de 2012 e 2013	26
6.2 Fertilidade do solo	29
6.3 Análise de fracionamento do fósforo	39
6.3.1 P RTA	39
6.3.2 P NaHCO ₃	41
6.3.3 P NaOH 0,1	47
6.3.4 P HCl	51

6.3.5 P NaOH 0,5.....	52
6.3.6 P Residual	56
6.3.7 P TOTAL.....	58
6.4 Cultura da soja – safra 2012/13 e 2013/14.....	60
6.4.1 Cultivo da braquiária e a produtividade da soja.....	60
6.4.2 Aplicação de fertilizantes fosfatados e a produtividade da soja	62
6.4.3 Diagnose foliar e exportação de P.....	65
7 CONCLUSÕES	70
8 REFERÊNCIAS.....	71

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1 – Características granulométricas do solo da área experimental.....	17
Tabela 2 – Médias de teor e acúmulo de P da parte aérea de braquiária na entressafra de 2012, em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P) e doses de P na semeadura da soja (0, 30 e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅).....	28
Tabela 3 – Valores médios de pH do solo (CaCl ₂) em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em quatro profundidades, 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm.....	29
Tabela 4 - Teores médios de matéria orgânica (M.O.) no solo em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em quatro profundidades, 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm.	30
Tabela 5 - Teores médios de P no solo em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.	30
Tabela 6 - Teores médios de P no solo em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.....	32
Tabela 7 - Teores médios de K no solo em função do desdobramento da interação tripla para avaliação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), para cada combinação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm.	34
Tabela 8 - Teores médios de K no solo em função do desdobramento da interação tripla para avaliação da presença e ausência de braquiária, para cada combinação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm.	34
Tabela 9 - Teores médios de K no solo em função do desdobramento da interação tripla para avaliação das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), para cada combinação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e da presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm. 35	

Tabela 10 - Teores médios de Mg no solo em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 10-20 cm.....36

Tabela 11 - Teores médios de Mn no solo em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 20-40 cm.38

Tabela 12 - Teores médios de Mn no solo em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 10-20 e 20-40 cm.38

Tabela 13 - Teores médios de P no solo, extraído com resina de troca aniônica (P RTA), em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.40

Tabela 14 - Teores médios de P no solo, extraído com resina de troca aniônica (P RTA), em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.40

Tabela 15 - Teores médios de P no solo, extraído com resina de troca aniônica (P RTA), em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em quatro profundidades, 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm.41

Tabela 16 - Teores médios de P total, extraído com NaHCO₃, em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na camada de 0-5 cm.....42

Tabela 17 - Teores médios de P total, extraído com NaHCO₃, em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.42

Tabela 18 - Teores médios de P total, extraído com NaHCO₃, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 5-10 cm.43

Tabela 19 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaHCO₃, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5 e 5-10 cm.....43

Tabela 20 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaHCO₃, em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.44

Tabela 21 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaHCO_3 , em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.	45
Tabela 22 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaHCO_3 , em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.	45
Tabela 23 - Teores médios de P extraído com RTA somado ao P extraído com NaHCO_3 , em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.	46
Tabela 24 - Teores médios de P extraído com RTA somado ao P extraído com NaHCO_3 , em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.	46
Tabela 25- Teores médios de P extraído com RTA mais o P extraído com NaHCO_3 , em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.	46
Tabela 26 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,1M, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.	47
Tabela 27 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,1M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.	48
Tabela 28 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaOH 0,1M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.	49
Tabela 29 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaOH 0,1M, em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.	50
Tabela 30 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaOH 0,1M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.	51
Tabela 31 - Teores médios de P extraído com HCl , em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.	52

Tabela 32 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,5M, em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.	53
Tabela 33 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,5M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 5-10 cm.	53
Tabela 34 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,5M, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 20-40 cm.	54
Tabela 35 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaOH 0,5M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.	55
Tabela 36 - Teores médios de P residual extraído com digestão nitroperclórica, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.	57
Tabela 37 - Teores médios de P residual extraído com digestão nitroperclórica, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 10-20 cm.	57
Tabela 38 - Teores médios de P TOTAL, calculado com o somatório de todas as frações, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.	59
Tabela 39 - Teores médios de P em trifólios de soja, em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.	65
Tabela 40 - Teores médios de P em trifólios de soja, em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.	66
Tabela 41 - Teores médios de N e Ca em trifólios de soja, em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.	66
Tabela 42 - Teores médios de N, K, Ca e Mn em trifólios de soja, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas na safra 2012/13.	67

Tabela 43 - Teores médios de Mg e Zn em trifólios de soja, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.67

Tabela 44 - Teores médios de Zn em trifólios de soja, em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.68

Tabela 45 – Teor de P para cada kg de grãos e exportação de P para cada 1000 kg de grãos de soja, em função do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), após a colheita na safra 2012/13.69

Tabela 46 – Teor de P para cada kg de grãos e exportação de P para cada 1000 kg de grãos de soja, em função do efeito de doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), após a colheita na safra 2012/13.69

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 – Temperatura e precipitação média mensal no período entre agosto de 2012 e abril de 2014.	18
Figura 2 – Valores médios de peso de matéria seca da parte aérea de braquiária na interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P) e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹), nas entressafras de 2012 e 2013.	27
Figura 3 – Produtividade de grãos de soja na safra 2012/13 e 2013/14, média dos tratamentos com e sem braquiária na entressafra. Médias seguidas pela mesma letra, para cada ano safra, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.	61
Figura 4 – Médias de produtividade de grãos de soja na interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P) e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹), nas safras 2012/13 e 2013/14. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada ano safra, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas comparam doses de P na semeadura e letras minúsculas comparam as fontes de P em cobertura.	62

1 RESUMO

Com rotação de culturas é possível obter benefícios do cultivo de algumas espécies vegetais com maior habilidade em absorver e solubilizar formas de fósforo (P) pouco lábeis, alterando a dinâmica deste nutriente no solo, e assim melhorar a disponibilidade do P para cultivos subsequentes. O objetivo desse estudo foi verificar se é possível obter vantagens na produtividade de soja em rotação com *Brachiaria ruziziensis* com relação à prática de pousio na entressafra, de acordo com a distribuição das formas de P no solo em função da disponibilização promovida pela braquiária. Foi dado continuidade a um experimento de campo, conduzido sob semeadura direta desde 2001, em Botucatu, SP. O ensaio foi avaliado durante dois anos safra (2012/13 e 2013/14), e recebeu o delineamento experimental em blocos casualizados, em parcelas sub-subdivididas. As parcelas receberam fontes de P aplicadas a lanço (Fosfato Natural de Arad – FNA, Superfosfato Triplo – SFT, ou uma testemunha sem P). Nas subparcelas, os tratamentos foram o cultivo de braquiária ou solo mantido em pousio na entressafra. As sub-subparcelas receberam doses de P aplicadas anualmente no sulco de semeadura da soja (0, 30, ou 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅). Foram feitas análises de fertilidade do solo e fracionamento do P em amostras de solo coletadas após a dessecação da braquiária, antes da semeadura da soja, em 2012. Foi observada maior disponibilidade de P após o cultivo de braquiária, em função da ciclagem de formas pouco lábeis de P, sendo menor a concentração do P fixado em camadas mais profundas do solo, e maior concentração de P lábil e moderadamente lábil nas camadas mais próximas da superfície. O cultivo da braquiária também resultou no aumento do teor de matéria orgânica, potássio e magnésio, próximo à superfície do solo. Contudo, a produtividade da soja foi menor após a braquiária do que após pousio, nos dois anos safra. Verificou-se menor concentração de P na análise foliar da soja, mesmo no tratamento com maior teor de P no solo, além de menor teor de nitrogênio, potássio, cálcio, manganês e zinco, sendo mais crítico para o caso do nitrogênio, em que foi constatado teores abaixo da faixa de suficiência para soja. Apesar da disponibilização de P promovida pelo cultivo da braquiária, não é possível aumentar a eficiência do uso de fertilizantes fosfatados e obter vantagens da rotação com essa espécie na produtividade de soja. Há a necessidade de realizar novos estudos para identificar o motivo da redução de produtividade da soja após a braquiária *ruziziensis*.

Palavras-chave: *Brachiaria ruziziensis*, biodisponibilidade de fósforo, fracionamento do fósforo

AVAILABILITY OF PHOSPHORUS IN SOIL CULTIVATED WITH BRACHIARIA IN ROTATION WITH SOYBEAN

Botucatu, 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: DANILO SILVA ALMEIDA

Adviser: CIRO ANTONIO ROSOLEM

2 SUMMARY

With crop rotation it is possible to get benefits by cropping some plant species with great capacity in uptake and also by enhancing the solubility of less labile phosphorus (P) forms, modifying the dynamics of this nutrient in the soil, and thus improving P availability for next crops. The objective of this work was to verify the possibility of increasing the yield of soybean in rotation with *Brachiaria ruziziensis* in the off-season compared to no crop rotation, according to P forms distribution in the soil and availability provided by ruzi grass. A field experiment in no-till has been performed in Botucatu, SP since 2001. The experiment was evaluated during two crop years (2012/13 and 2013/14). The experimental design was a complete randomized blocks, with split-split plot arrangement. The plots received sources of P applied in the soil surface (Natural reactive phosphate of Arad – FNA, Triple Superphosphate – SFT, and a control with no P). In the subplots, the treatments were presence and absence of ruzi grass during the off-season. The sub-subplots received levels of P applied every year in the seed furrow during the sowing of soybean (0, 30, or 60 kg ha⁻¹ of P₂O₅). Analyzes of soil fertility and P fractionation were made in samples collected after ruzi grass desiccation and before the sowing of soybean, in 2012. Greater availability of P was observed after ruzi grass cultivation, due to cycling of less available P forms, with lowest concentration of P fixed in deep layers of soil, and higher concentration of P labile and moderately labile in the upper soil layers. The ruzi grass crop increased the concentration of organic matter, potassium and magnesium, next to the soil surface. However, the yield of soybean was lower after ruzi grass than after no crop rotation, during the two crop years. A lower concentration of P in leaf analysis of soybean was verified, even in the treatment with higher concentration of P in the soil, and a lower concentration of other nutrients in leaf: nitrogen, potassium, calcium, manganese, and zinc. The nitrogen concentration in soybean leaf after ruzi grass crop was below the critical level. Despite the availability of phosphorus increased by *B. ruziziensis* crop, is not possible to get advantages of the rotation with this specie over the soybean yield and increase the efficiency of fertilizers use. Further studies are required in order to identify the cause of reduction in the yield of soybean after ruzi grass.

Keywords: *Brachiaria ruziziensis*, bioavailability of phosphorus, phosphorus fractionation.

3 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente frequentemente disponível em quantidade limitante para a produtividade dos cultivos, devido à alta capacidade de fixação de P nos solos, principalmente em regiões tropicais onde os solos são ricos em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), e com pH baixo (RICHTER; BABBAR, 1991). Normalmente é necessária a aplicação de uma quantidade de P maior do que a exportada pelas culturas, em função da adsorção do P em formas com grande estabilidade de ligação aos componentes do solo (OLIVEIRA, 1982; NOVAIS; SMYTH, 1999; CHIEN et al., 2011). Mas, ao contrário do que se imaginava no começo do século passado, o P não é fixado em formas irreversíveis, e sempre haverá um equilíbrio nas formas de P do solo, tanto no sentido da adsorção quanto no sentido da dessorção (SYERS et al., 2008). Porém, como conciliar esse conceito de dessorção do P com as técnicas agronômicas para acessar formas pouco lábeis de P e aumentar a eficiência do uso de fertilizantes, ainda é uma questão atual e que deve levar em consideração diversos fatores para ser solucionada. Alguns trabalhos tem constatado a contribuição de espécies vegetais no aumento da disponibilidade de P no solo, devido às características dessas espécies, como a alta eficiência na absorção de P e liberação de ácidos orgânicos, resultando em melhor aproveitamento do P e na possibilidade de disponibilizá-lo para as culturas subsequentes (NEUMANN; RÖMHELD, 1999; REDEL et al., 2007).

Entre as mais de 100 espécies de braquiária, a *Urochloa ruziziensis* (R. Germ. & C.M. Evrard) Morrone & Zuloaga (syn. *Brachiaria ruziziensis*), originária do Vale Ruzi no Zaire (Congo) e Burundi, tem sido amplamente introduzida em rotação de

culturas no Brasil, pois apresenta destaque quanto ao potencial produtivo em solo e clima tropical, palatabilidade e qualidade nutritiva para animais, e facilidade de manejo na dessecação (BODDEY et al., 2006). De acordo com Boddey et al. (2006), algumas espécies de braquiária possuem as seguintes adaptações à baixa disponibilidade de P no solo: extenso sistema radicular, que resulta em maior superfície de contato com o solo; alta capacidade de absorção de P por unidade de comprimento da raiz; habilidade de acessar formas solúveis e insolúveis de P, que geralmente não são disponíveis para outras plantas; e alta afinidade com micorrizas arbusculares.

Quando cultivada em rotação de culturas sob semeadura direta, Merlin (2013) observou que ocorre aumento do P disponível no perfil do solo após o cultivo de braquiária *ruziziensis* durante o período de entressafra de soja. De acordo com Janegitz (2012) o cultivo da braquiária na entressafra resulta em redução da capacidade máxima de fixação de P no solo e aumento do teor de P microbiano, melhorando a eficiência de utilização de fertilizantes fosfatados. Contudo, Merlin (2013) e Janegitz (2012) não observaram efeito do cultivo de braquiária sobre a produtividade da soja.

Assim, questões importantes ainda não foram resolvidas sobre os efeitos de braquiárias sobre a disponibilidade de P do solo, e levantam-se as hipóteses de que a maior disponibilidade de P pelo cultivo de braquiária pode ser resultada do aumento de formas orgânicas de P, que não são capazes de atender a demanda das plantas de soja em tempo adequado, e por isso não tem sido obtidos resultados em produtividade de soja; e o cultivo de braquiária pode elevar a eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados de acordo com a fonte, modo ou dose aplicada no solo, resultando em menor consumo de fertilizantes.

O objetivo desse trabalho foi verificar o efeito da disponibilidade e a distribuição de formas de P em solo com diferentes históricos de adubação fosfatada após o cultivo de braquiária *ruziziensis*, bem como a resposta da soja à adubação fosfatada e à disponibilização do P pelo cultivo da braquiária.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Fertilizantes fosfatados

Os fertilizantes fosfatados minerais são obtidos de fontes naturais não renováveis (ZAPATA; ROY, 2004). Considerando-se que o P é um elemento essencial para a produção agrícola, sem sucedâneo e finito, é interessante o desenvolvimento de tecnologias que maximizem a eficiência de utilização deste nutriente.

As rochas fosfatadas são compostas basicamente por dois grupos de minerais, as apatitas e as fosforitas. As apatitas possuem origem vulcânica, e são encontradas no Brasil, Canadá, Rússia, e África do Sul. Já as fosforitas possuem origem sedimentar, e são encontradas no Norte da África, China, Oriente Médio, e Estados Unidos (SOUSA et al., 2010). Atualmente, 85% da produção mundial de P é originária de depósitos sedimentares, sendo o Marrocos o maior exportador de fosfato do mundo (LOPES et al., 2004; TROEH; THOMPSON, 2005).

Os fertilizantes fosfatados mais comumente utilizados são: fosfatos naturais, termofosfatos, fosfato monoamônio (MAP), fosfato diamônio (DAP), superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), e polifosfato de amônio (APP) (CHIEN et al., 2011). O fosfato natural ou fosfato de rocha é produzido apenas com a moagem e concentração dos minérios da rocha fosfática, e devido ao menor processamento industrial o custo deste fertilizante é menor (ZAPATA; ROY, 2004).

A classificação dos fertilizantes fosfatados é obtida de acordo com a solubilidade em água, em citrato neutro de amônio (CNA), e em ácido cítrico (AC).

Sabendo-se o produto e sua solubilidade, pode-se inferir sua eficiência agronômica, ou seja, sua capacidade de fornecer P para as plantas (CHIEN et al., 2011).

Os fosfatos naturais brasileiros produzidos em Araxá, Patos de Minas, e Catalão, por exemplo, apresentam solubilidade extremamente baixa, e consequentemente possuem eficiência agronômica muito reduzida. Isso se deve às apatitas de origem ígnea, com estrutura de cristais grandes e próximas da composição da fluorapatita (OLIVEIRA et al., 1982). O fosfato de Araxá, por exemplo, apresenta 33% de P_2O_5 total, mas apenas 2,8% solúvel em CNA (ZAPATA; ROY, 2004). Os fosfatos naturais, como o de Gafsa, Carolina do Norte, Israel, Argélia, e Marrocos, são considerados reativos na forma farelada, e em geral são mais eficientes que os fosfatos de origem nacional, pois apresentam estrutura de cristais pequena, com alta porosidade (OLIVEIRA et al., 1982). Por exemplo, o fosfato natural de Arad, na região do deserto de Negev em Israel, possui 33% de P_2O_5 , e 7,1% destes são solúveis em CNA (ZAPATA; ROY, 2004). Esses fosfatos reativos apresentam índice de eficiência agronômica médio para culturas anuais no primeiro cultivo, e que evolui nos anos seguintes, quando comparado ao superfosfato triplo, principalmente em solos ácidos (CHOUDHARY et al., 1995; SOUSA et al., 2010).

Os superfosfatos simples e triplo, MAP e DAP, possuem mais de 90% do P total solúvel em CNA + água, elevada eficiência agronômica, e correspondem à aproximadamente 95% do P_2O_5 utilizado na agricultura brasileira (SOUSA et al., 2010).

Mesmo em solos com alta capacidade de fixação, fontes pouco solúveis de P podem ser viáveis sob o ponto de vista agronômico e econômico (PROCHNOW et al., 2006). Segundo Goedert e Souza (1984), as fontes mais eficientes inicialmente são os fosfatos solúveis, mas fosfatos naturais como o de Gafsa (Norte da África) possuem efeito similar aos solúveis, devido ao aumento da solubilidade após alguns anos da aplicação, tornando-se uma opção mais econômica para o produtor.

Algumas espécies de plantas tem sido reportadas por serem capazes de aumentar a eficiência de uso de fosfatos naturais. Habib et al., (1999) demonstraram que a exsudação de ácidos orgânicos por raízes de nabo é responsável por aumentar a solubilização de fosfatos naturais em solos calcários. Haynes (1992) atribuiu as modificações na rizosfera de algumas espécies, principalmente a redução do pH, à uma oportunidade de aumentar a eficiência de uso de fertilizantes pouco solúveis. Dessa forma, a espécie cultivada, assim como a seleção de fontes de fertilizantes fosfatados, doses,

formas, e época de aplicação devem ser cuidadosamente consideradas para aumentar a eficiência de uso desses fertilizantes (CHIEN; MENON, 1995; CHIEN et al., 2011).

4.2 Formas de fósforo no solo

A concentração de P na solução do solo é extremamente pequena, e por isso o teor de P na solução do solo deve ser mantido em equilíbrio durante o ciclo das culturas (HINSINGER, 2001). Considerando o exemplo clássico apresentado por Van Raij (1991), em uma situação que o solo apresenta 25% de umidade e com o teor de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ de P na solução do solo, o P solúvel em toda a camada arável (0-20 cm) será apenas de 50 g ha^{-1} , em um determinado momento, o que está bem longe do exigido pela maioria das culturas anuais, que utilizam cerca de 10 a 30 kg ha^{-1} de P durante o ciclo de desenvolvimento (TROEH; THOMPSON, 2005).

Para manter o teor de P na solução do solo, é preciso que o P presente na matéria orgânica seja mineralizado, ou os íons de fosfato adsorvidos sejam liberados dos compostos sólidos do solo (LAEGREID et al., 1999). Qualquer P que possa fazer parte da solução do solo dentro de um curto período até poucas semanas e, portanto, capaz de manter constante o equilíbrio de P da solução do solo, é considerado disponível para as plantas e denominado de P lábil (TROEH; THOMPSON, 2005).

A adição de fertilizantes fosfatados no solo, orgânicos ou inorgânicos, incrementa o teor de P na solução do solo, assim como a liberação de P orgânico pelos compostos orgânicos do solo e a mineralização do P orgânico em P inorgânico pela ação de microorganismos. Mas esse aumento do P na solução do solo ocorre por um curto período, pois o P solúvel, que não é absorvido pelas plantas ou imobilizado na biomassa microbiana, passa rapidamente para a fase sólida por um processo de adsorção (OLIVEIRA, 1982; GONÇALVES; MEURER, 2009). Inicialmente o P adsorvido passa a compor o P lábil, mas com o tempo se transforma em P não lábil, também denominado de P fixado ou ocluso, que possui ligações químicas mais estáveis e geralmente representa a maior parte do P no solo (VAN RAIJ, 1991).

4.2.1 P inorgânico

O P na solução do solo está presente na forma de íons ortofosfatos (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) derivados do ácido ortofosfórico, H_3PO_4 (RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2002). A forma de ocorrência desses íons fosfatos é principalmente

dependente do pH, sendo a forma H_2PO_4^- mais comum em solos ácidos, e o HPO_4^{2-} comum em solos alcalinos. O íon PO_4^{3-} ocorre em valores extremamente baixos e não é significativo na nutrição das espécies cultivadas. O íon H_2PO_4^- é a forma mais prontamente absorvida pelas plantas, mas a forma HPO_4^{2-} também pode ser requerida por algumas espécies (TROEH; THOMPSON, 2005; SANCHEZ, 2007; SYERS et al., 2008).

O P inorgânico é encontrado predominantemente ligado aos compostos de Fe e Al em solos ácidos, e Ca em solos calcários (LINDSAY, 1979). O produto final da reação entre hidróxidos de Fe e Al são a strengita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e a variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), respectivamente. Já os compostos de Ca com o P são vários, sendo que a sequência desses, do menos ao mais insolúvel, é a seguinte: fosfato dicálcico (CaHPO_4), fosfato tricálcico [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$], fosfato octocálcico [$\text{Ca}_8(\text{PO}_4)_6$], hidroxiapatita [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] e fluorapatita [$\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6$] (SIQUEIRA et al., 2004).

Nota-se que as formas de P ligados ao cálcio, ferro e alumínio podem existir em estado mais ou menos lábil, sendo que o tempo de formação destes compostos e o pH do solo são os principais fatores que influenciam na labilidade do P. O pH em torno de 6,5 é o mais favorável para a disponibilidade de P, sendo este o valor em que os fosfatos de Fe e Al são tão solúveis quanto os fosfatos de Ca (VAN RAIJ, 1991; TROEH; THOMPSON, 2005).

A adsorção dos íons fosfatos ocorre inicialmente com a atração eletrostática, seguida de uma adsorção específica ou quimiossorção, principalmente da borda dos minerais de argila, oxihidróxidos de Fe e Al. O íon fosfato pode ser adsorvido por ligações monodentadas, em que apenas um oxigênio do fosfato é ligado a um metal, ou ligações bidentadas, com a ligação de dois oxigênios com um metal, ou ainda binucleada, com a ligação de dois oxigênios a dois átomos de metal. A estabilidade do fosfato com o metal é crescente entre as ligações monodentadas para as bidentadas e binucleadas (PARFITT, 1978). Quando o íon fosfato é adsorvido por hidróxidos de Fe e Al há a substituição de dois íons adjacentes da hidroxila, e por isso o fosfato fica fortemente preso nesses metais (TROEH; THOMPSON, 2005). A adsorção dos P aos minerais que contêm Ca inicia-se com a quimiossorção, seguida pela cristalização, e crescimento do cristal pela formação de novas camadas, caracterizando o envelhecimento dos fosfatos de Ca (PARFITT, 1978). O envelhecimento ou oclusão do P adsorvido aos oxihidróxidos de Fe e Al se dá com o passar do tempo, formando compostos binucleados (RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2008).

4.2.2 P orgânico

O P orgânico faz parte dos materiais orgânicos ou da matéria orgânica do solo e é liberado após a degradação destes compostos, dessa forma o P orgânico pode ser adquirido por microorganismos ou por plantas, após reação de hidrólise (SANCHEZ, 2007). Mas também, o P orgânico pode ser estabilizado como parte da matéria orgânica do solo ou por interações do grupo fosfato com minerais do solo (MOUCAWI et al., 1981). A maior parte do P orgânico ocorre na forma de monoésteres, como o inositol (30-50% do P orgânico total), seguido pelos ácidos nucleicos e nucleotídeos (3-5%), fosfolipídeos e outras formas em pequenas concentrações (RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2002; SIQUEIRA et al., 2004).

A composição típica do P orgânico retido no solo e do P orgânico livre na solução é bastante diferente, devido à preferência de estabilização das formas em que o P orgânico é encontrado (STEWART; TIESSEN, 1987). A alta carga de fosfatos nos inositóis permite rápida adsorção destes nos minerais do solo, e uma extensiva interação com sesquióxidos, o que protege os inositóis da degradação. Fosfodiésteres, como ácidos nucleicos e fosfolipídeos possuem menor densidade de cargas e seus grupos fosfatos são considerados protegidos de interações iônicas, o que os torna acessíveis aos microorganismos e ataque de enzimas, e explica sua menor concentração no solo (TATE, 1984). A presença de Fe^{3+} pode retardar a degradação de ésteres, mas ao mesmo tempo reduz a extratibilidade de P (MOUCAWI et al., 1981). Ácidos fúlvicos associados com P, constituem uma larga fração de P no solo, e são considerados relativamente lábeis, já os ácidos húmicos associados com P são menos afetados em curto prazo (SHARPLEY, 1995).

Portanto, o P orgânico pode ser encontrado em formas lábeis e pouco lábeis no solo. Quando o P orgânico ocorre em macromoléculas, há a necessidade de degradação em moléculas menores, suficientemente pequenas para serem mineralizadas pelos microorganismos, e a forte interação de fosfatos orgânicos com sesquióxidos ou com a matéria orgânica exige a ação de enzimas que atuem diretamente nessas ligações (NATH, 1969). A reação com enzimas fosfatases é a principal forma de mineralização do P orgânico. Essas enzimas podem ser produzidas por microorganismos ou plantas em situações de baixa disponibilidade de P inorgânico (SIQUEIRA et al., 2004).

Com o processo de intemperização do solo, as formas lábeis de P diminuem, e a participação do P orgânico no total de P do solo tende a aumentar de acordo com o sistema de cultivo, sendo maior nos sistemas que visam a conservação de resíduos

vegetais sobre o solo. Dessa forma, a dinâmica do P no solo pode passar a ser governada por processos biológicos (CROSS; SCHLESINGER, 1995; SHARPLEY, 1995; RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2008).

A distribuição das formas de P nos diversos sítios do solo apresentada na presente revisão de literatura, pode ser quantificada por meio de métodos de fracionamento químico do P (STEWART; TIESSEN, 1987; HEDLEY et al. 1982, GUO; YOST, 1998; GATIBONI et al., 2013).

4.3 Fracionamento do fósforo

Utilizando-se procedimentos de extração sequencial é possível fracionar o P inorgânico e orgânico de acordo com a estabilidade química deste nutriente em relação a reagentes específicos (SHARPLEY, 1995). Tais procedimentos de fracionamento do P têm sido utilizados para um melhor entendimento da biodisponibilidade de P e redistribuição das formas de P no solo (STEWART; TIESSEN, 1987). Hedley e colaboradores desenvolveram um dos mais complexos métodos de extração sequencial de P em 1982, que vem sendo aplicado e aprimorado por diversos outros pesquisadores, na intenção de facilitar sua execução e aumentar a eficiência das extrações. Atualmente, uma das modificações mais aceitas e reproduzidas do método de fracionamento elaborado por Hedley et al. (1982) é a proposta por Condrón e Goh em 1989 (GATIBONI et al., 2013), que basicamente compreende a seguinte ordem de extração: resina trocadora de ânions (RTA), bicarbonato de sódio (NaHCO_3), hidróxido de sódio (NaOH 0,1 mol L^{-1}), ácido clorídrico (HCl), uma segunda extração por hidróxido de sódio, mas em maior concentração (NaOH 0,5 mol L^{-1}), e finalmente uma digestão do solo. Nos extratos obtidos após a extração por bicarbonato de sódio e ambas as concentrações de hidróxido de sódio, são separadas duas alíquotas: uma para quantificar o P inorgânico, imediatamente após a extração, e outra alíquota é submetida à digestão com ácido sulfúrico e persulfato de amônio em autoclave, para determinar o P total destes extratos. A diferença entre o P total e o P inorgânico revela o teor de P orgânico em cada extrato (CONDROÑ; GOH, 1989).

Não existem métodos capazes de remover apenas o P lábil do solo, sendo insensíveis a outras formas de P, e o mesmo é válido para a fração moderadamente lábil. O que se pode resultar em maior exatidão é a determinação de P total do solo, por métodos que destroem completamente a matriz do solo e liberam todas as formas de P.

Dessa forma, a divisão de formas lábeis, moderadamente lábeis, e não lábeis dentro das análises de laboratório é ilustrativa, servindo apenas para demonstrar que há formas de P com maior ou menor capacidade de suprir o P na solução do solo (RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2008; GATIBONI et al., 2013). Além disso, o método de fracionamento é bastante dispendioso e não é possível inseri-lo nas análises de rotina (SYERS et al., 2008). Contudo, sabe-se que as formas de P mais lábeis possuem menor energia de ligação com os componentes do solo, e que as menos lábeis possuem ligações do tipo bidentada ou binucleada. Nesse contexto, as técnicas de fracionamento são bastante válidas no meio científico para compreender a distribuição das formas de P no solo (SHARPLEY, 1995; HINSINGER, 2001).

De acordo com as modificações de Condron e Goh no método de Hedley, a resina trocadora de ânions é capaz de extrair o P disponível na solução do solo e também formas bastantes lábeis de P inorgânico. A extração de P por bicarbonato de sódio também tem sido relacionada à extração de P altamente lábil e, portanto, disponível para as plantas em formas orgânicas e inorgânicas, que não foram extraídas pela resina (BOWMAN; COLE, 1978). A extração com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) é associada com as formas de P inorgânico e orgânico quimiossorvidos a óxidos de Fe e Al, e pode ser considerada moderadamente lábil. O HCl é capaz de extrair o P inorgânico retido ao Ca, e também pode ser moderadamente lábil. Já a extração com NaOH na concentração $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ revela formas de P ocluso, pouco lábeis. Por último, a extração do P restante na amostra, revela formas de P recalcitrantes, fixados com alta energia nos componentes do solo (GATIBONI et al., 2013).

Guo e Yost (1998) agruparam as frações de P de acordo com a disponibilidade destas, a fração de P inorgânico extraída com NaHCO_3 é sempre bastante lábil para as plantas, já solos pouco intemperizados possuem mais frações moderadamente lábeis que solos bastante intemperizados, sendo que todas as frações de P orgânico e o P inorgânico extraído com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ são consideradas moderadamente lábeis em solo pouco intemperizados, e apenas a fração de P inorgânico extraída com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ é considerada moderadamente lábil em solos mais intemperizados. Esses mesmos autores também apontam que o P residual é mais dificilmente acessado em solos bastante intemperizados. As frações de P extraídas com a RTA e NaHCO_3 possuem estreita relação entre si, e possuem grande correlação com a absorção de P pelas plantas, atuando na reposição de P da solução do solo (GATIBONI et al., 2007). Gonçalves e Meurer (2009)

também observaram que as frações do P extraídas com NaOH 0,1 mol L⁻¹ possuem estreita relação com o P absorvido por plantas de arroz.

4.4 Biodisponibilidade de fósforo

Em experimentos de longa duração como o de Rothamsted, no Reino Unido, onde o P tem sido aplicado como fertilizante mineral ou orgânico, apenas um pequeno aumento da porcentagem de P na solução do solo é observada nas análises de rotina, em relação ao aumento de P total no solo (BLAKE et al., 2003). Porém quando se leva em consideração as espécies cultivadas, o teor de P disponível no solo pode ser alterado de forma mais expressiva (REDEL et al., 2007).

Alguns mecanismos são utilizados pelas plantas em condições de deficiência de P no solo, para que o suprimento deste nutriente não se torne um fator limitante da produção de biomassa. Alterações morfológicas e fisiológicas no sistema radicular possuem grande destaque nesse contexto (BUCHER, 2007).

Dentre os mecanismos que aumentam a aquisição de P pelas plantas, destacam-se: aqueles que aumentam a extensão de solo explorado; aqueles que envolvem interações ou simbioses com microorganismos; e aqueles que aumentam a solubilidade de fosfatos adsorvidos ou precipitados (JONES, 1998; RAGHOTHAMA, 1999; HINSINGER, 2001; MIYASAKA; HABTE, 2001; DAKORA; PHILLIPS, 2002). Existe uma grande diferença no potencial produtivo e de absorção de P do solo entre as espécies cultivadas, pois há diferenças nas estratégias desenvolvidas pelas raízes para aumentar a aquisição deste nutriente, e nem todas as espécies possuem as adaptações necessárias (CHIEN; MENON, 1995; DAKORA; PHILLIPS, 2002).

Enquanto que o aumento na biomassa radicular determina um maior custo relacionado com a produção e manutenção de raízes, o aumento na produção de raízes resulta em maior área superficial em contato com o solo, favorecendo a absorção de um nutriente tão pouco móvel como o P (WANG; YAN; LIAO, 2010). O investimento no sistema radicular com relação a melhor absorção de P não está relacionado com a interceptação deste nutriente pelas raízes, e sim na promoção de uma maior difusão do P, devido ao aumento da área superficial do sistema radicular (BARLEY, 1970). Raízes mais finas e mais compridas resultam em aumento da superfície radicular, que junto com os

pêlos radiculares, são mais eficientes em explorar um maior volume de solo e adquirir mais P (VANDAMME et al., 2012).

A associação com micorrizas promove aumento da capacidade de absorção de P, exploração do solo, e aquisição de formas de P não prontamente disponíveis após a solubilização dessas pelos fungos (MIYASAKA; HABTE, 2001). Enquanto que raízes não colonizadas por micorrizas possuem uma extensão da zona de absorção de P próxima do comprimento dos pêlos radiculares, quando há associação com micorrizas, a zona de absorção é bem maior, sendo esta a maior vantagem dessa associação (BUCHER, 2007).

O aumento da concentração de P na rizosfera é resultado de mecanismos de algumas plantas que são capazes de aumentar a disponibilidade de P inorgânico. A deficiência de P no solo, induz a síntese de enzimas fosfatases (DUFF et al., 1994), seguido pelo aumento da liberação dessas enzimas junto dos exsudados das raízes (HINSINGER, 2001). A exsudação de ácidos orgânicos atua em papel fundamental na nutrição mineral das plantas (DAKORA; PHILLIPS, 2002), principalmente na disponibilização de P em solos ácidos (NEUMANN; RÖMHELD, 1999; HU et al., 2005). Os ácidos orgânicos são capazes de competir pelos sítios de adsorção dos compostos de Ca, Fe, Mn, e Al presentes no solo, e então reduzir adsorção do P nesses compostos. Os ácidos orgânicos também são capazes de formar complexos com esses metais reduzindo a adsorção de P no solo (JONES, 1998; HU et al., 2005; GUPPY et al., 2005).

Leguminosas também são capazes de exsudar ácidos orgânicos para se adequar a baixa disponibilidade de P (DAKORA; PHILLIPS, 2002). Porém nem todas as leguminosas exsudam quantidades suficientes de ácidos orgânicos (OHWAKI; HIRATA, 1992).

A dessorção de P é extremamente dependente da concentração e dos tipos de ácidos orgânicos no solo, necessária para mobilizar quantidades significantes de P para a solução do solo (JONES, 1998; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Essa alta concentração é necessária em função da sequência de preferência dos sítios de adsorção aniônica no solo: fosfato>>> oxalato> citrato> malato>> acetato, e por isso a concentração de ácido orgânico deve ser alta para ter efeito significativo na competição com o fosfato pelo sítio de adsorção (HU et al., 2005; GUPPY et al., 2005).

Nesse sentido, plantas de soja são pouco eficientes, pois exsudam cerca de 24 vezes menos ácidos orgânicos do que plantas de grão de bico, uma espécie

bastante eficiente na absorção do P, e dentre os ácidos exsudados por plantas de soja, a concentração de ácido cítrico e málico é bastante baixa (OHWAKI; HIRATA, 1992). Durante a fixação simbiótica de N₂ em plantas de soja, ocorre a acidificação da rizosfera (RAVEN et al., 1990), o que pode reduzir ainda mais a eficiência de plantas de soja em disponibilizar P em solos ácidos, onde a participação de P ligado ao Ca é pequena em relação ao P ligado ao Fe e Al (QIN et al., 2011).

Quando uma cultura apresenta baixa eficiência para a aquisição do P no solo, é interessante realizar o cultivo prévio de espécies mais eficientes para incrementar a disponibilidade de P no solo. O acúmulo de P no tecido de plantas de cobertura em sistemas de rotação de culturas é uma estratégia para evitar a estabilização do P em formas pouco lábeis (CORRÊA et al., 2004). Além do mais, algumas espécies de cobertura são mais eficientes na solubilização de formas de P do solo, tornando o processo de ciclagem mais pronunciado (REDEL et al., 2007). Neumann e Römheld (1999) verificaram que o cultivo de tremoço aumenta a disponibilidade de P no solo, por meio da exsudação de ácidos orgânicos e fosfatases. Redel et al. (2007) observaram maior disponibilidade de P lábil e redução do P residual após o cultivo de aveia, e principalmente após o cultivo de tremoço.

Espécies do gênero *Brachiaria* têm sido estudadas em sistemas de produção que visam ao aumento da disponibilização de P no solo (MERLIN et al., 2013), uma vez que possuem diversas vantagens em solos de condições tropicais, pois são pouco exigentes em fertilidade química do solo, capazes de suportar pH baixo, alto teor de alumínio, e baixos teores de P no solo, devido à várias características, como: morfologia e arquitetura de raízes; relação parte aérea e radicular próxima de 1,0; quantidade de pêlos radiculares; produção de enzimas fosfatases; e exsudação de ácidos orgânicos (BODDEY et al., 1996).

A braquiária *ruziziensis*, mesmo em baixa disponibilidade de P, produz mais biomassa da parte aérea e radicular do que *B. decumbens*, e também alta atividade de fosfatase ácida nas raízes e maior plasticidade morfológica no sistema radicular, de acordo com os teores de P disponíveis (LOUW-GAUME et al., 2010). Häussler et al. (2006) verificaram que mesmo sob condições limitantes de P no solo, a braquiária *ruziziensis* não apresenta sintomas de deficiência de P, devido à grande eficiência de absorção de P por unidade de comprimento de raiz. Wenzl et al. (2001) observaram que plantas de braquiária *ruziziensis* são capazes de exsudar grandes

quantidades de ácido cítrico, oxálico e málico, pelas raízes, quando cultivadas com Al tóxico. Merlin (2012) relatou a alta capacidade dessa braquiária em absorver e disponibilizar P quando este foi aplicado com complexos de Fe e Al, observando o desenvolvimento normal destas plantas e maiores níveis de P disponível no solo após o cultivo de braquiária.

O aumento do teor de matéria orgânica em sistemas que visam à conservação de palhada sobre o solo é uma estratégia conveniente para aumentar a eficiência de uso do P. As grandes produções de parte aérea e raízes por braquiárias são capazes de elevar os teores de carbono orgânico na camada superficial do solo após a decomposição do material vegetal (SOUSA et al., 2010), resultando em liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição (JONES, 1998; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Além disso, a grande capacidade de absorver o P do solo por plantas de braquiária *ruziziensis* resulta em ciclagem desse nutriente, promovendo acúmulo nas primeiras camadas do solo após a decomposição da parte aérea e do sistema radicular.

O baixo revolvimento no solo reduz o contato entre as partículas do solo e os íons fosfatos, resultando em menor reação de adsorção. O recobrimento da superfície do solo com resíduos vegetais é capaz de alterar a infiltração de água; a temperatura, a umidade, e a atividade biológica no solo; e também o movimento, distribuição, e disponibilidade de nutrientes no solo (DUIKER; BEEGLE, 2006; GALVANI et al., 2008; CALONEGO; ROSOLEM, 2013).

A mobilidade de H_2PO_4^- na solução do solo é muito baixa, devido aos mecanismos físicos químicos que o atraem para a superfície dos coloides (HINSINGER, 2001). Por outro lado, após ser absorvido pelas raízes, o movimento do P no interior da planta é alto, e as raízes das plantas atuam como veículo de distribuição de P no perfil do solo. Dessa forma, em sistema de semeadura direta também tem sido observado o aumento do teor de P em camadas mais profundas do solo. Essa redistribuição de P no perfil tem sido atribuída à liberação de ácidos orgânicos, complexação do Al trocável, e decomposição de raízes no solo, (HAFNER et al., 1993; PAVINATO; ROSOLEM, 2008; SOUSA et al., 2010).

O sistema de semeadura direta se sobressai ao sistema convencional em relação ao aproveitamento do P devido à diversas vantagens: redução da erosão, com conseqüente menor perda de P por escoamento superficial; maior capacidade de armazenamento de água, o que permite melhor difusão dos íons fosfatos para as raízes;

menor adsorção de P ao solo, devido ao baixo revolvimento do solo; redistribuição do P no solo, promovido pela decomposição de raízes; reciclagem do P, por meio de rotação com espécies vegetais eficientes na absorção de formas pouco lábeis de P; maior atividade microbiana devido a maior oferta de C no solo; e à complexação de óxidos de Fe e Al por ácidos orgânicos liberados pela decomposição da matéria orgânica (DUIKER; BEEGLE, 2006; ANGHINONI, 2007; LIENHARD et al., 2013).

Portanto, os benefícios da semeadura direta podem ser ainda maiores quando se utilizam espécies adequadas na rotação de culturas, permitindo maior biodisponibilização de P para as culturas seguintes, e maximizando a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados. O emprego de técnicas de fracionamento do P pode melhorar a compreensão da dinâmica do P no sistema de rotação de braquiária na entressafra de soja.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Caracterização da área experimental

As avaliações foram realizadas no período de agosto de 2012 à abril de 2014, em experimento de longa duração, instalado na Fazenda Experimental Lageado (FCA/UNESP), Botucatu, Estado de São Paulo, localizado à latitude de 22°51' S, longitude de 48°26' W Grw, e na altitude de 840 m. A área vem sendo cultivada sob semeadura direta desde 2001. Desde 2006, metade das parcelas da área experimental vem sendo cultivada com sistema de rotação de culturas: braquiária ruziziensis [*Urochloa ruziziensis* (R. Germ. & C.M. Evrard) Morrone & Zuloaga (syn. *Brachiaria ruziziensis*)] na entressafra de soja [*Glycine max* (L.) Merrill], enquanto que a outra metade é mantida em pousio durante o período de entressafra da soja. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (EMBRAPA, 1999), de textura média (Tabela 1), com relevo plano a suave ondulado, e com boa drenagem.

Tabela 1 – Características granulométricas do solo da área experimental.

Profundidade	Características granulométricas			Textura
	Argila	Silte	Areia	
(cm)	----- (g kg ⁻¹) -----			
0-5	210	20	770	Média
5-10	220	10	770	Média
10-20	220	10	770	Média
20-40	250	20	730	Média

O clima é caracterizado como mesotérmico úmido e do tipo Cwa segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual em torno de 1450 mm, a temperatura média do mês mais quente é superior a 28 °C e a do mês mais frio é de 13 °C (CEPAGRI). A Figura 1 apresenta os dados de temperatura e precipitação referentes ao período de avaliação deste estudo, que foram coletados na estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agrônômicas.

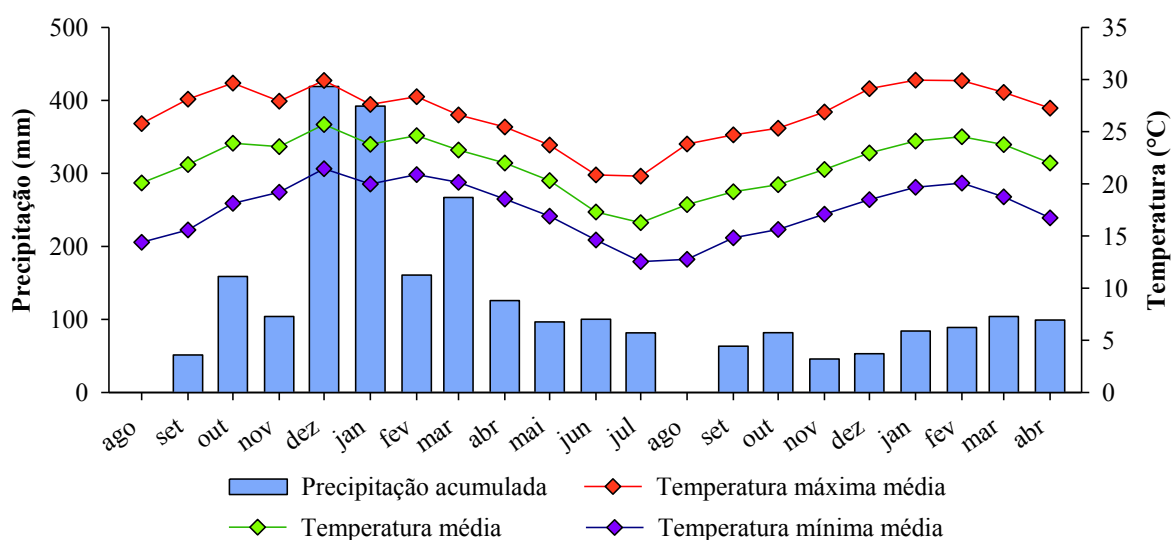


Figura 1 – Temperatura e precipitação média mensal no período entre agosto de 2012 e abril de 2014.

5.2 Delineamento e histórico da área experimental

O delineamento experimental é em blocos casualizados, em parcelas sub-subdivididas, com quatro repetições, sendo que o sorteio dos tratamentos para cada unidade experimental foi realizado uma única vez, na ocasião da instalação do experimento. O delineamento recebeu o esquema fatorial triplo, 3x2x3. Os tratamentos nas parcelas correspondem à aplicação de duas fontes de P (Fosfato natural reativo de Arad - FNA, e Superfosfato Triplo - SFT) e um tratamento controle sem aplicação de P. Nas subparcelas os tratamentos correspondem ao cultivo de braquiária na entressafra e ao solo mantido em pousio, e nas sub-subparcelas são doses de P: 0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, aplicadas no sulco de semeadura da soja (ao lado e abaixo das sementes), na forma de Superfosfato Triplo.

A área está dividida em quatro blocos, os tratamentos com fontes de P a lanço e mais a testemunha sem P foram aplicados em parcelas de 240 m² (30 m x 8

m), com área útil de 196 m² (28 m x 7 m), e separadas por 9 m. As subparcelas apresentam área total de 40 m² (8 m x 5 m) e área útil de 18 m² (3 m x 6 m), receberam os tratamentos presença ou ausência de braquiária na entressafra e as doses de P no sulco de semeadura.

Entre 2001 e 2010, as parcelas receberam 5 aplicações de SFT e FNA a lanço, na dose de 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹, totalizando 400 kg de P₂O₅ ha⁻¹, enquanto que as parcelas correspondentes ao tratamento controle não receberam aplicações de P à lanço. A partir de 2006 foram adotados os tratamentos com e sem braquiária na entressafra de soja, nas subparcelas. As doses de 0, 30, e 60 kg de P₂O₅ ha⁻¹ na linha de semeadura da soja são aplicadas anualmente nas sub-subparcelas desde 2006, com a fonte SFT.

A última correção de acidez foi realizada em Abril de 2010, por meio da aplicação superficial de calcário dolomítico (PRNT de 92%).

5.3 Condução do experimento no ano safra 2012/13

Todas as avaliações químicas de solo e planta foram realizadas em amostras coletadas no primeiro ano safra de condução do experimento, 2012/13. A produtividade das culturas de braquiária e soja foram analisadas nos dois anos safra, 2012/13 e 2013/14.

5.3.1 Cultivo da braquiária – entressafra de 2012

Apesar da área do experimento ter sido cultivada com braquiária *ruiziensis* após a colheita de soja desde 2006, as condições climáticas nem sempre foram favoráveis para estabelecer a cultura da braquiária. O início da estação seca e fria, após a colheita da soja, impede uma adequada germinação das sementes de braquiária e, em virtude disso, no ano de 2012 foi necessário realizar a semeadura da braquiária no final do mês de setembro, logo no início da estação chuvosa.

Foi realizado o controle químico das plantas daninhas infestantes antes da semeadura da braquiária, no dia 19/09/2012. Utilizou-se o herbicida 2,4-D (DMA 806 BR) na dose 2 L ha⁻¹ (p.c.), e o herbicida glifosato (Roundup WG) na dose 1,5 kg ha⁻¹ (p.c.).

No dia 25/09/2012 foi realizada a semeadura da braquiária nas subparcelas que correspondem ao tratamento com braquiária, enquanto que as outras subparcelas foram mantidas em pousio. A semeadura foi feita sem a aplicação de fertilizantes, com uma semeadora-adubadora de fluxo contínuo de arrasto, desenvolvida

para semeadura direta (Semeato, modelo THM 13 – Personale Drill), equipada com 13 linhas espaçadas a 0,17 m entre si. Foram semeados 25 kg ha⁻¹ de sementes de braquiária *ruziziensis* com 70% de germinação e pureza de 99%.

No dia 23/11/2012, foi feita a dessecação da área com Roundup WG 720 na dose de 2,5 kg ha⁻¹ (p.c.). A dessecação foi realizada com pulverizador de barra equipado com 24 bicos do tipo AXI 11002, com pressão de trabalho de 50 PSI e vazão de 200 L ha⁻¹.

5.3.2 Cultivo da soja – safra 2012/13

A semeadura da soja foi realizada no dia 30/11/2012, com a mesma semeadora utilizada na semeadura de braquiária, mas equipada com 5 linhas espaçadas a 0,45 m entre si. Foram semeadas 26 sementes por metro, da cultivar Monsoy 7211 RR, com 80% de germinação, tratadas com o inseticida Tiametoxam (Cruiser 350 FS) na dose 3 mL kg⁻¹ (p.c.) de sementes, com o fungicida Carboxina e Tiran (Vitavax-Thiran 200 SC) na dose 3 mL kg⁻¹ (p.c.) de sementes, e com inoculante líquido com bactérias do gênero *Bradyrhizobium* (Biomax – Biosoja), na dose 2 mL kg⁻¹ de sementes.

Foram aplicadas as doses de SFT (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅) nas subparcelas, e 40 kg de K₂O com a fonte cloreto de potássio em todas as parcelas, logo abaixo e ao lado do sulco de semeadura.

Aos 35 dias após a emergência (9/01/2013) e no dia 20/02/2013, foi realizado o controle químico de plantas daninhas com o herbicida glifosato, na dose 2 kg ha⁻¹ (p.c.). Foi realizado um total de 5 aplicações de fungicidas ao longo do ciclo (23/01, 05/02, 20/02, 01/03, 06/03/2013), alternado os fungicidas Piraclostrobina e Epoxiconazol (Opera) na dose 500 mL ha⁻¹ (p.c.), e Azoxistrobina e Ciproconazol (Priori Xtra) na dose 300 mL ha⁻¹ (p.c.). O controle de percevejos foi feito com duas aplicações de Tiametoxam (Engeo Pleno) na dose 200 mL ha⁻¹ (p.c.) (05/02 e 01/03/2013), e duas aplicações de Acefato (Orthene 750 BR) na dose 0,5 kg ha⁻¹ (p.c.) (20/02 e 06/03/2013). O controle de lagartas foi feito com o inseticida Metomil (Lannate BR) na dose 1 L ha⁻¹ (p.c.) nas datas 20/02 e 06/03/2013, e com o inseticida Clorantraniliprole (Premio) na dose 50 mL ha⁻¹ (p.c.) no dia 01/02/2013.

Aos 119 dias após a semeadura, foi feita a dessecação das plantas de soja com o herbicida não seletivo Paraquat (Gramoxone 200) na dose 2 L ha⁻¹ (p.c.).

Todas as pulverizações foram realizadas com pulverizador de barra equipado com 24 bicos do tipo AXI11002, com pressão de trabalho de 50 PSI e a vazão de 200 L ha⁻¹.

A colheita foi realizada aos 131 dias após a semeadura, no dia 09/04/2013, com uma colhedora de parcelas automotriz da marca Wintersteiger SeedMech, modelo Nursery Master Elite.

5.3.3 Avaliações no solo

Foi feita a coleta de amostras de solo nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, no dia 27/11/2012, após a dessecação da braquiária e antes da semeadura da soja. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em peneira de malha de 2 mm para posteriores análises químicas.

Foi feita a determinação do pH (CaCl₂), teor de matéria orgânica, acidez potencial (H+Al), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), soma de bases trocáveis (SB), e capacidade de troca de cátions (CTC), e saturação por bases (V%), e alguns micronutrientes: cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), e zinco (Zn), pelos métodos descritos por Van Raij et al. (2001).

5.3.3.1 Fracionamento do fósforo

Foi feito o fracionamento do P do solo de acordo com as modificações propostas por Condron e Goh (1989) sobre o método descrito por Hedley et al. (1982). Amostras de 0,5 g de solo foram acondicionadas em tubos de centrífuga e submetidas à seguinte sequência de extração: resina de troca aniônica, RTA - 204SZRA-88091668 (GE Water & Process Technologies, Trevose, PA, USA); bicarbonato de sódio 0,5 mol L⁻¹ (NaHCO₃), com pH 8,5; hidróxido de sódio 0,1 mol L⁻¹ (NaOH 0,1 mol L⁻¹); ácido clorídrico 1 mol L⁻¹ (HCl); hidróxido de sódio 0,5 mol L⁻¹ (NaOH 0,5 mol L⁻¹); e após as extrações, o solo foi seco em estufa a 50 °C, moído em gral de ágata, e 0,1 g desse solo foi submetido à digestão nitroperclórica (HNO₃ + HClO₄, na proporção 5:3) de acordo com o proposto por Chen et al. (2000) para extração do P residual, utilizando a técnica descrita por Olsen e Sommers (1982).

Para evitar o resíduo de extratores nas extrações seguintes, o solo foi centrifugado com solução de NaCl 0,5 mol L⁻¹ após a retirada de cada extrato, de acordo com o descrito por Gatiboni et al. (2013).

Nos extratos ácidos, obtidos com as extrações por RTA, HCl, e digestão nitroperclórica, foram determinados os teores de P inorgânico (Pi) segundo o método de azul de molibdato e ácido ascórbico descrito por Murphy e Ryley (1962). Dessa forma, foram obtidas as frações P RTA, P HCl, e P residual.

Os extratos alcalinos, obtidos com as extrações por NaHCO_3 e NaOH 0,1 e 0,5 mol L⁻¹, foram separados em duas alíquotas. Na primeira alíquota de cada um desses extratos, foi determinado o P inorgânico, logo após a extração, de acordo com o método descrito por Dick e Tabatabai (1977), para evitar que a hidrólise do P orgânico presente no extrato superestime o teor de P inorgânico. Dessa forma, foram obtidas as frações de P inorgânico: Pi NaHCO_3 , Pi NaOH 0,1, e Pi NaOH 0,5. A segunda alíquota destes extratos foi submetida à digestão com persulfato de amônio e ácido sulfúrico em autoclave, para determinação do P total nos extratos. A diferença entre o P total e o P inorgânico corresponde ao P orgânico (Po) para cada extrato. Sendo assim, foram obtidas as frações: P total NaHCO_3 , Po NaHCO_3 , P total NaOH 0,1, Po NaOH 0,1, P total NaOH 0,5, e Po NaOH 0,5. Todas as análises do fracionamento foram realizadas em triplicata, para obter maior confiabilidade nos resultados.

As determinações dos teores de P foram realizadas com espectrofotômetro (Modelo 600S, FEMTO). A soma de todas as frações extraídas na análise de fracionamento foi identificada por P TOTAL.

5.3.5 Avaliações nas plantas – safra 2012/13

Foram coletadas amostras de parte aérea da braquiária para determinação do peso de matéria seca, teor e acúmulo de P no dia 22/11/2012. As amostras foram coletadas utilizando-se um quadro de madeira com 0,25 m² de área (0,5 x 0,5 m), totalizando 4 amostras por parcela. O material coletado foi seco em estufa de ventilação forçada à temperatura de 65° C por 72 horas, efetuando-se posteriormente a pesagem das amostras. Foram tomadas sub-amostras de 30 g para análise química de P, e o restante da matéria seca foi devolvida para suas respectivas parcelas no campo. As sub-amostras foram moídas, até passar por peneiras de 1 mm de malha, acondicionadas em sacos de papel, e armazenadas em local apropriado, para realização da análise química.

Foram coletados 30 trifólios de soja em cada unidade experimental para a diagnose foliar quando a soja estava na fase R₂ (FEHR et al.,1971), aos 65 dias após a semeadura (DAS), no dia 02/02/2013. Foram coletadas as terceiras folhas completamente

desenvolvidas, a partir do ápice da haste principal, de forma aleatória. As folhas foram secas em estufa de aeração forçada a 60 °C por 72 h, e moídas para análise química e determinação dos teores de macro nutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), e magnésio (Mg); e micro nutrientes: cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), e zinco (Zn), segundo Malavolta et al. (1997). Quando a cultura estava em R₆ (FEHR et al., 1971), aos 94 DAS, foram coletadas 10 plantas de soja (parte aérea) com o objetivo de determinar a produção de matéria seca e acúmulo de P. O teor de P nas plantas foi analisado de acordo com o método descrito por Malavolta et al. (1997). Em todos os extratos, o P foi determinado por colorimetria de acordo com Murphy e Riley (1962).

No momento da colheita foi avaliado também o número de plantas das 3 linhas da área útil das unidades experimentais utilizadas na colheita para a determinação do número de plantas por metro. Quando a soja atingiu maturidade de colheita, foram colhidas três linhas de 6 m de comprimento (8,1 m²) de cada sub-parcela. Após a colheita mecânica, foi determinado o peso de grãos com balança eletrônica de precisão (0,01 g) e, em seguida amostras foram colocadas em estufa de aeração forçada a 105 °C para correção da produtividade considerando o teor de 13% de umidade. Após estas determinações, as amostras foram moídas em moinho elétrico tipo “Willey” e armazenadas para a determinação da exportação de P pelos grãos de soja.

5.4 Condução do Experimento no ano safra 2013/14

Apenas a produtividade de grãos de soja e peso de matéria seca de braquiária foram avaliadas no segundo ano safra, e os equipamentos e maquinários utilizados na condução do experimento foram os mesmos e com as mesmas regulagens da safra anterior.

5.4.1 Cultivo da braquiária – entressafra de 2013

No segundo ano, foram semeados 10 kg ha⁻¹ de sementes de braquiária *ruziziensis* com 70% de germinação e pureza de 99% no dia 17 de abril, logo após a colheita da soja, e o estande de plantas após a emergência foi adequado para garantir uma adequada população de plantas durante todo o inverno, e portanto, não foi necessário uma nova semeadura no mês de setembro.

Não foi necessário realizar o controle de plantas infestantes antes da semeadura da braquiária, devido à aplicação do herbicida Paraquat na dessecação da

soja, o que foi suficiente para o controle inicial do mato. Nos dias 12 de junho e 21 de agosto de 2013, o herbicida 2,4-D (DMA 806 BR) foi aplicado na dose de $1,5 \text{ L ha}^{-1}$ (p.c.).

A dessecação da braquiária foi realizada no dia 31 de outubro, com a aplicação de $2,33 \text{ kg ha}^{-1}$ (p.c.) do herbicida glifosato (Roundup 720 WG).

5.4.2 Cultivo da soja – safra 2013/14

No dia 11 de novembro foi semeada a cultivar de soja BMX Potência RR, utilizando-se 19,5 sementes por metro com 80% de germinação e espaçamento entre linhas de 0,45 m. O tratamento de sementes foi idêntico ao utilizado na semeadura da soja na safra anterior.

O controle químico de plantas daninhas foi realizado no dia 09/01/14 com o herbicida glifosato, na dose 2 kg ha^{-1} (p.c.). As aplicações de fungicidas foram realizadas nos dias 09/01, 21/01, e 19/02/14, alternado os fungicidas Piraclostrobina e Epoxiconazol (Opera) na dose 500 mL ha^{-1} (p.c.), e Azoxistrobina e Ciproconazol (Priori Xtra) na dose 300 mL ha^{-1} (p.c.). No dia 09/01/14 foi necessária a aplicação de Acefato (Orthene 750 BR) para o controle de ácaros, na dose $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (p.c.), e para o controle de percevejos foi feita uma aplicação de Tiametoxam (Engeo Pleno) na dose 200 mL ha^{-1} (p.c.) no dia 19/02/14. O controle de lagartas foi feito com o inseticida Metomil (Lannate BR) na dose 1 L ha^{-1} (p.c.) nos dias 07 e 21 de março de 2014.

Foi feita a dessecação da soja no dia 04/04/2014, com a aplicação do herbicida não seletivo Paraquat (Gramoxone 200) na dose 2 L ha^{-1} (p.c.), e a colheita no dia 08/04/2014 aos 149 dias após a semeadura, colhendo-se 3 linhas de 6 m ($8,1 \text{ m}^2$).

5.4.3 Avaliações nas plantas – safra 2013/14

Amostras de parte aérea da braquiária foram coletadas para determinação do peso de matéria seca, no dia 26/10/2013. Foram utilizados os mesmos métodos da safra anterior para a amostragem e determinação do peso de matéria seca da braquiária.

Após a colheita da soja na segunda safra (2013/14) foi determinada somente a produtividade de grãos, seguindo o mesmo método descrito para a safra anterior, com correção da umidade dos grãos para 13%.

5.5 Análise dos resultados

Os dados foram submetidos à análise de variância, teste F a 5% de probabilidade, e quando apresentaram significância, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5%, utilizando o software SAS, versão 9.4.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Cultura da braquiária – entressafra de 2012 e 2013

A produtividade média de matéria seca da parte aérea de braquiária no primeiro ano foi de 1370 kg ha⁻¹ (Figura 2). Essa baixa produtividade decorreu do curto período para o crescimento das plantas, entre o início da estação chuvosa, em setembro, até a dessecação, no mês de novembro. Segundo Souza Sobrinho et al. (2009), a produtividade média de matéria seca da rebrota de *B. ruziziensis* pode alcançar até 8250 kg ha⁻¹ em apenas três meses, entre o mês de janeiro e o mês de março, mas a produtividade da rebrota entre o mês de maio e outubro é de apenas 1270 kg ha⁻¹, devido às condições climáticas para as diferentes épocas.

Na entressafra de 2013 a produtividade de braquiária teve uma média de 6642 kg ha⁻¹ (Figura 2) e foi em média 4,8 vezes maior do que no primeiro ano de avaliação do experimento. O adequado estabelecimento da cultura logo após a colheita da soja, num período ainda favorável para o crescimento e desenvolvimento das plantas de braquiária foi fundamental para alcançar uma alta produtividade até o mês de novembro, quando foi realizada a dessecação para posterior semeadura da soja (SOUZA SOBRINHO et al., 2009).

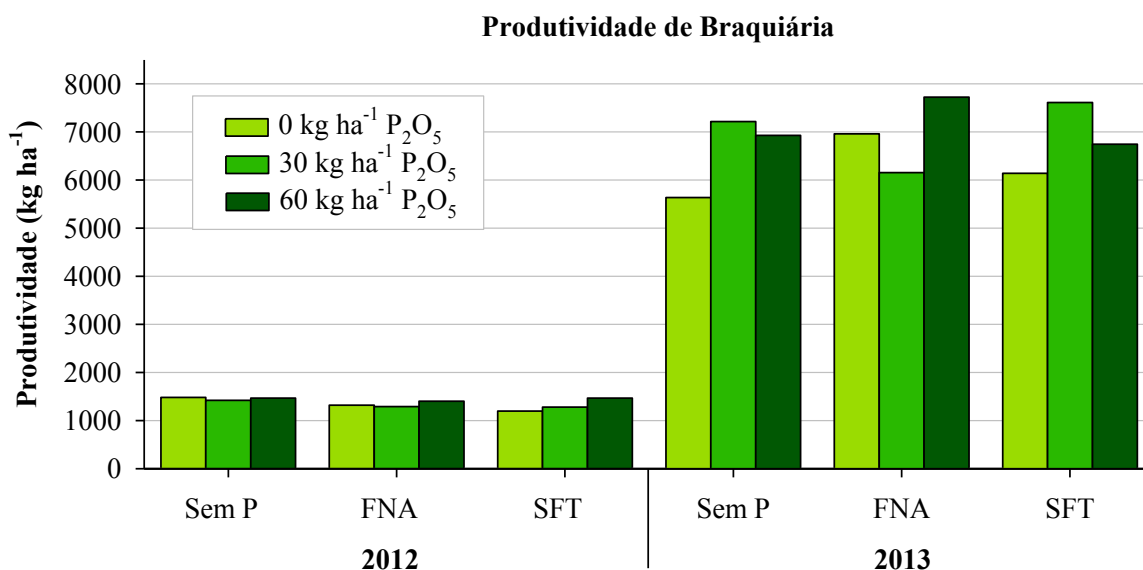


Figura 2 – Valores médios de peso de matéria seca da parte aérea de braquiária na interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P) e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg P₂O₅ ha⁻¹), nas entressafras de 2012 e 2013.

Não houve interação dos fatores para nenhum dos itens avaliados, durante as duas entressafras. A produtividade de matéria seca e o teor de P da parte aérea das plantas de braquiária não foram afetados pelo efeito residual das fontes de P aplicadas a lanço, ou pelo efeito residual das doses da adubação fosfatada nos cultivos anteriores de soja.

A ausência de diferenças na produtividade de matéria seca da parte aérea em função dos tratamentos avaliados é semelhante ao encontrado por Magalhães et al. (2007), que obtiveram diferenças apenas com doses de nitrogênio aplicadas no cultivo da braquiária. Isso reflete à alta habilidade dessa espécie em se desenvolver em condições de baixa disponibilidade de P no solo (MACEDO, 2004).

Os teores de P encontrados estão acima do nível de suficiência para gramíneas, que se situa na faixa de 0,8 – 1,2 g kg⁻¹ (MALAVOLTA, 1997). Não foram encontradas diferenças entre o teor de P na média dos tratamentos com SFT e FNA em relação à ausência de P aplicado a lanço, o que revela que não há efeito residual dessas adubações sobre a absorção de P nas plantas de braquiária (Tabela 2).

Tabela 2 – Médias de teor e acúmulo de P da parte aérea de braquiária na entressafra de 2012, em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P) e doses de P na semeadura da soja (0, 30 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

P cobertura	Teor de P (mg kg ⁻¹)				Acúmulo de P (kg ha ⁻¹)			
	P semeadura							
	0	30	60	Média	0	30	60	Média
Sem P	1,46	1,69	1,79	1,65	2,16	2,40	2,87	2,47
FNA	1,74	1,82	1,66	1,74	2,28	2,35	2,34	2,32
SFT	1,70	1,84	1,87	1,80	2,04	2,33	2,71	2,36
Média	1,63	1,78	1,77		2,16 b	2,36 ab	2,64 a	

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

O acúmulo de P na parte aérea da braquiária teve diferenças entre as dose 0 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Os valores de acúmulo de P obtidos na parte aérea não foram suficientes para caracterizar uma ciclagem deste nutriente de forma expressiva no ano de 2012, devido principalmente ao curto período e às restrições hídricas e térmicas para o crescimento das plantas, entre setembro e novembro.

Em trabalho conduzido por Hare et al., (2005) com adubação nitrogenada no cultivo de *B. ruziziensis*, verificou-se uma produtividade média de 11500 kg ha⁻¹ de matéria seca da parte aérea no período chuvoso, com essa produtividade o acúmulo de P na parte aérea é cerca de 9 vezes maior do que o obtido no primeiro ano deste presente estudo. Já no segundo ano, a produtividade foi elevada e a ciclagem de P foi provavelmente bastante significativa. A produção de raízes por plantas de braquiária é alta (BODDEY et al., 1996), e por isso a ciclagem de nutrientes é bem mais elevada quando se leva em consideração o acúmulo de P nas raízes e aumento do teor de matéria orgânica no solo (SOUSA et al., 2010).

Devido à falta de respostas às formas de adubação fosfatada na produtividade da braquiária, pode-se concluir que essa espécie de braquiária é capaz de alcançar grande produtividade mesmo em situações de baixa disponibilidade de fósforo. Apesar de aumentar a disponibilidade de fósforo no solo, a braquiária utiliza pouco P do solo e é possível que a braquiária não aproveite boa parte do total do P disponibilizado para seu próprio crescimento, permitindo as próximas culturas de se beneficiarem com essa disponibilização de P.

6.2 Fertilidade do solo

Foi observada uma grande redução do pH de acordo com o aumento da profundidade do solo (Tabela 3), e um consequente aumento da acidez potencial, com valores de 21, 34, 50, e 63 mmol_c dm⁻³ nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm, respectivamente. Houve diferenças para as médias de pH nas camadas de 0-5, 10-20 e 20-40 cm apenas para a aplicação de P na semeadura da soja, sendo que nesses casos o valor do pH decresceu com o aumento da dose de P. De acordo com Mokwunye e Chien (1980) a hidrólise dos superfosfatos resulta em acidificação do solo. Já a acidez potencial do solo (H+Al) não apresentou diferenças para nenhum dos fatores analisados.

Tabela 3 – Valores médios de pH do solo (CaCl₂) em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em quatro profundidades, 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm.

Profundidade (cm)	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
	----- pH (CaCl ₂) -----			
0-5	6,1 A	6,0 A	5,8 B	5,9
5-10	5,1 A	5,1 A	4,9 A	5,1
10-20	4,3 A	4,2 AB	4,2 B	4,3
20-40	4,1 A	4,0 B	4,0 B	4,1

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O teor de matéria orgânica no solo foi elevado nas parcelas com rotação com braquiária (Tabela 4), desde a superfície do solo até 20 cm de profundidade, o que pode resultar em aumento da disponibilidade de P de diversas formas (SILVA et al., 1997; ALMEIDA et al., 2003; GOEDERT; OLIVERA, 2007). A rotação com braquiária sob semeadura direta é capaz de elevar os teores de matéria orgânica leve e carbono total do solo, que estão relacionados à redução do processo de adsorção do P ao solo (PEREIRA et al., 2010). O acúmulo de matéria orgânica está relacionado com a manutenção do pH em faixas altas, entre 5,4 e 6,5 (FRANCHINI et al., 2001), no entanto não houve diferenças entre o pH em função do maior acúmulo de matéria orgânica após o cultivo de braquiária. Apesar da maior concentração de matéria orgânica após a braquiária, os valores médios encontrados são ainda baixos, e por isso o poder tampão da matéria orgânica sobre o pH não foi observado.

Tabela 4 - Teores médios de matéria orgânica (M.O.) no solo em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em quatro profundidades, 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm.

Profundidade (cm)	Braquiária	Pousio	Média
----- M.O. (g dm ⁻³) -----			
0-5	20,4 A	15,6 B	18,0
5-10	14,9 A	12,3 B	13,6
10-20	13,1 A	10,9 B	12,0
20-40	12,1 A	11,7 A	11,9

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As camadas de solo avaliadas apresentaram um gradiente de concentração de P resina, determinada pelo método descrito por Van Raij et al. (2001), com grande acúmulo nas primeiras camadas do solo (Tabela 5). Este acúmulo de P na superfície é comumente observado em sistemas com baixo revolvimento do solo (DUIKER; BEEGLE, 2006; PAVINATO; ROSOLEM, 2008; PAVINATO et al., 2009b).

Tabela 5 - Teores médios de P no solo em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.

Braquiária	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
----- P (mg kg ⁻¹) -----				
0-5 cm				
Com	35,7 Bb	52,1 Aa	55,6 Aa	47,8
Sem	43,5 Aa	41,3 Ab	45,7 Ab	43,5
Média	39,6	46,7	50,7	45,7
5-10 cm				
Com	15,6 Ba	22,6 Aa	28,7 Aa	22,3
Sem	15,8 Aa	16,0 Aa	21,1 Ab	17,6
Média	15,7	19,3	24,9	20,0
10-20 cm				
Com	7,0 Ca	9,1 Ba	12,6 Aa	9,6
Sem	7,4 Ba	7,8 Ba	9,6 Ab	8,2
Média	7,2	8,4	11,1	8,9

*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Houve a interação do cultivo de braquiária e aplicação de P na semeadura de cultivos anteriores de soja para o teor de P no solo, nas três primeiras camadas (Tabela 5). Quando não houve aplicação de P na semeadura da soja em cultivos anteriores, o teor de P no solo cultivado com braquiária na entressafra é menor do que o solo mantido em pousio. Mas quando houve aplicação de P na semeadura da soja, principalmente na dose 60 kg ha^{-1} , o teor de P foi maior após o cultivo de braquiária, até 20 cm de profundidade. O aumento dos teores de matéria orgânica, e a provável exsudação de ácidos orgânicos tanto pelas raízes da braquiária quanto pela decomposição da matéria orgânica, favorecem a maior disponibilidade de P na fração lábil (JONES, 1998; FRANCHINI et al., 2001; PAVINATO; ROSOLEM, 2008), mas isso só é possível após adubações com fosfatos. Quando não é feita a adubação fosfatada, a própria braquiária é capaz de consumir ou mobilizar o pouco P disponível no solo para outras camadas, resultando em diluição do P no perfil do solo. Merlin et al., (2013) também observou que a disponibilidade de P foi maior após o cultivo de braquiária apenas quando há aplicação de fosfatos.

Também houve interação P semeadura e P cobertura na primeira e terceira camada de solo para o teor de P (Tabela 6). Quando não houve a aplicação de P em cobertura, a aplicação apenas na linha de semeadura não foi suficiente para proporcionar os mesmos teores de P, tanto na primeira quanto na terceira camada do solo. Vários autores indicam a necessidade de uma adequada adubação de correção com incorporação no solo na ocasião da instalação do sistema de semeadura direta, e por um lado a grande quantidade de P aplicado a lanço no presente estudo pode ter desempenhado esse papel da adubação e correção após vários anos de cultivo (ANGHINONI, 2007; SOUSA et al., 2010). Por outro lado, as aplicações de SFT em cobertura foram suficientes para elevar o teor de P no solo até mesmo na profundidade de 10-20 cm, independente da adubação de P na semeadura, devido à redistribuição do P aplicado a lanço (CORRÊA et al., 2004; NUNES et al., 2011). A baixa mobilidade do P no solo reduz a eficiência da adubação fosfatada em cobertura, e quando o teor de P no solo já está alto, a adubação fosfatada na linha de semeadura tem baixa eficiência (SOUSA et al., 2010). Nas parcelas que receberam a aplicação de FNA em cobertura, o teor de P foi ainda maior na primeira camada do solo do que quando a fonte aplicada foi o SFT. Isso ocorre devido à menor solubilidade do FNA que proporciona maior efeito residual no solo, com aumento da sua eficiência ao longo dos anos (NOVAIS; SMITH, 1999).

Tabela 6 - Teores médios de P no solo em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.

P cobertura	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
----- P (mg kg ⁻¹) -----				
0-5 cm				
Sem P	18,0 Bb	28,6 Ab	26,7 Ac	24,4
FNA	50,1 Ca	58,2 Ba	70,2 Aa	59,5
SFT	50,8 Aa	53,3 Aa	55,1 Ab	53,1
Média	39,6	46,7	50,7	45,7
5-10 cm				
Sem P	7,4	12,4	18,1	12,6 b
FNA	21,4	21,9	27,6	23,6 a
SFT	18,4	23,6	29,0	23,7 a
Média	15,7 C	19,3 B	24,9 A	20,0
10-20 cm				
Sem P	5,2 Ba	7,9 Aa	7,6 Ab	6,9
FNA	7,3 Ba	7,7 Ba	12,6 Aa	9,2
SFT	9,1 Aa	9,7 Aa	13,0 Aa	10,6
Média	7,2	8,4	11,1	8,9

*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na segunda camada, tanto a adubação de cobertura quanto a de semeadura tiveram efeito no teor de P, mas sem interações (Tabela 6). Houve aumento dos teores de P no solo com aplicações de P em cobertura, sendo que as fontes aplicadas não apresentaram diferenças entre si, mas o teor de P no solo foi ainda mais elevado quando foi aplicada a maior dose de P na semeadura da soja. Apenas a adubação a lanço resultou em diferenças no teor de P na última profundidade, sendo que o teor de P após aplicações de SFT foi igual a 4,3 mg kg⁻¹, e maior que os teores de P nas parcelas que receberam FNA, 3,6 mg kg⁻¹, e sem P, 3,3 mg kg⁻¹.

A semelhança dos teores de P na segunda e terceira camada entre as fontes de P aplicadas em cobertura se deve ao aumento da eficiência do FNA provocado por diversos fatores, como: pH do solo, teor de Ca trocável, capacidade de adsorção de P do solo, e teor de matéria orgânica (CHIEN; MENON, 1995). O pH do solo tem pequeno efeito sobre a eficiência do SFT, mas o FNA é altamente dependente do pH baixo para ser solubilizado, assim como o encontrado nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, em média 5,1 e

4,3, respectivamente. O baixo teor de Ca nas camadas de 5-10 e 10-20 cm (21,4 e 8,2 mmol_c dm⁻³ respectivamente) favorece a solubilização do FNA devido à facilidade de quebra da ligação entre os fosfatos e o cálcio dos fosfatos de rocha nessa situação (HAMMOND et al., 1986).

Houve diferenças para o teor de Ca da primeira camada do solo entre as parcelas que receberam aplicações de P em cobertura (47,6 e 46,3 mmol_c dm⁻³ para as fontes FNA e SFT, respectivamente) e as parcelas que não receberam (41,0 mmol_c dm⁻³). Essas diferenças se devem à composição dos grupos minerais que compõem as rochas fosfatadas, que contém Ca (GALVANI et al., 2008).

Também houve diferenças nos teores de K e Mg em diversas camadas do solo. Para o K, foram observadas interações triplas nas três primeiras camadas, sendo várias as possíveis causas dessa interação, e para o Mg houve efeito dos diversos fatores avaliados. A presença de Ca na composição dos fertilizantes fosfatados, pode afetar a disponibilidade de K e Mg devido a competição com os sítios de troca catiônica do solo, e na decomposição dos materiais vegetais há liberação de Ca, Mg e K (FRANCHINI et al., 2001; PAVINATO et al., 2009a). O cultivo de *B. ruziziensis* também pode aumentar a disponibilidade de K no solo, pois essa espécie também é capaz de solubilizar formas pouco disponíveis de K, reduzir a perdas de K por lixiviação, e aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes potássicos (CALONEGO; ROSOLEM, 2013).

No desdobramento da interação tripla, a análise do teor de K em função das fontes de P aplicadas em cobertura para cada combinação dos fatores braquiária e P aplicado na semeadura, revelou que a aplicação das fontes de P nem sempre afetaram o teor de K quando comparadas com o tratamento sem P aplicado a lanço (Tabela 7).

Avaliando o teor de K no solo em função do cultivo de braquiária ou não, dentro de cada combinação de aplicação de fontes de P a lanço e doses de P na semeadura da soja (Tabela 8), observou-se que o teor de K é maior após o cultivo de braquiária quando não houve aplicação de P a lanço e independente da dose de P na semeadura. O teor de K é menor após o cultivo de braquiária na camada 5-10 apenas quando foi aplicado FNA e a dose 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅. E na camada 0-5, o teor de K é menor após braquiária quando não houve aplicação de P na semeadura e houve aplicação de SFT. Dessa forma, salvo poucas exceções, o teor de K foi geralmente maior após o cultivo de braquiária do que no solo mantido em pousio.

Tabela 7 - Teores médios de K no solo em função do desdobramento da interação tripla para avaliação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), para cada combinação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

P cobertura	Combinações dos tratamentos com e sem braquiária x doses de P					
	Com e 0	Com e 30	Com e 60	Sem e 0	Sem e 30	Sem e 60
----- K (mmol _c dm ⁻³) -----						
0-5 cm						
Sem P	2,3 a	1,9 a	1,6 b	1,4 b	1,3 a	1,3 a
FNA	1,4 b	1,2 b	2,0 a	1,5 b	1,3 a	1,3 a
SFT	1,3 b	2,1 a	2,0 a	2,1 a	1,4 a	1,4 a
5-10 cm						
Sem P	1,4 a	1,4 a	1,6 a	1,0 a	1,1 a	1,1 b
FNA	1,0 b	1,2 b	1,0 b	1,0 a	1,0 a	1,4 a
SFT	1,4 a	1,6 a	1,6 a	0,7 b	1,0 a	1,1 b
10-20 cm						
Sem P	1,1 a	1,2 a	0,9 a	0,9 a	0,8 a	1,0 a
FNA	1,1 a	0,7 b	0,9 a	0,8 ab	0,9 a	1,0 a
SFT	1,3 a	0,8 b	1,2 a	0,5 b	0,7 a	0,8 a

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 8 - Teores médios de K no solo em função do desdobramento da interação tripla para avaliação da presença e ausência de braquiária, para cada combinação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Braquiária	Combinações dos tratamentos fontes de P x doses de P								
	Sem P 0	Sem P 30	Sem P 60	FNA 0	FNA 30	FNA 60	SFT 0	SFT 30	SFT 60
----- K (mmol _c dm ⁻³) -----									
0-5 cm									
Com	2,3 a	1,9 a	1,6 a	1,4 a	1,2 a	2,0 a	1,3 b	2,1 a	2,0 a
Sem	1,4 b	1,3 b	1,3 a	1,5 a	1,3 a	1,3 b	2,1 a	1,4 b	1,4 b
5-10 cm									
Com	1,4 a	1,4 a	1,6 a	1,0 a	1,2 a	1,0 b	1,4 a	1,6 a	1,6 a
Sem	1,0 b	1,1 b	1,1 b	1,0 a	1,0 b	1,4 a	0,7 b	1,0 a	1,1 b
10-20 cm									
Com	1,1 a	1,2 a	0,9 a	1,1 a	0,7 a	0,9 a	1,3 a	0,8 a	1,2 a
Sem	0,9 a	0,8 b	1,0 a	0,8 b	0,9 a	1,0 a	0,5 b	0,7 a	0,8 b

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Já a análise do teor de K em função das doses de P na semeadura de cultivos anteriores de soja para cada combinação das fontes de P e do manejo na entressafra, com ou sem braquiária, permitiu observar que as doses de P afetaram o teor de K principalmente na camada de 0-5 cm (Tabela 9).

Tabela 9 - Teores médios de K no solo em função do desdobramento da interação tripla para avaliação das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), para cada combinação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e da presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

P semeadura	Combinações dos tratamentos fontes de P x com e sem braquiária					
	Sem P com	Sem P sem	FNA com	FNA sem	SFT com	SFT sem
----- K (mmol _c dm ⁻³) -----						
0-5 cm						
0	2,3 a	1,4 a	1,4 b	1,5 a	1,3 b	2,1 a
30	1,9 b	1,3 a	1,2 b	1,3 a	2,1 a	1,4 b
60	1,6 b	1,3 a	2,0 a	1,3 a	2,0 a	1,4 b
5-10 cm						
0	1,4 a	1,0 a	1,0 a	1,0 b	1,4 a	0,7 b
30	1,4 a	1,1 a	1,2 a	1,0 b	1,6 a	1,0 a
60	1,6 a	1,1 a	1,0 b	1,4 a	1,6 a	1,1 a
10-20 cm						
0	1,1 ab	0,9 a	1,1 a	0,8 a	1,3 a	0,5 a
30	1,2 a	0,8 a	0,7 a	0,9 a	0,8 b	0,7 a
60	0,9 b	1,0 a	0,9 ab	1,0 a	1,2 a	0,8 a

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os teores de Mg foram maiores após o cultivo de braquiária (25,1 mmol_c dm⁻³) do que após pousio (22,7 mmol_c dm⁻³) apenas na primeira camada do solo. Na segunda camada, não foi observada nenhuma diferença, e o teor médio foi de 10,5 mmol_c dm⁻³. Na camada de 10-20 cm, ocorreu interação das aplicações de P em cobertura e da presença e ausência da braquiária (Tabela 10), sendo que o teor de Mg foi menor após a braquiária apenas quando foi aplicado o FNA, e as fontes de P não afetaram o teor de Mg quando comparado com o tratamento sem P a lanço. A última camada apresentou menor teor de Mg quando houve a aplicação de FNA, 2,62 mmol_c dm⁻³, enquanto que nos tratamentos com SFT e sem P a lanço os teores foram 3,17 e 3,20 mmol_c dm⁻³, respectivamente.

Tabela 10 - Teores médios de Mg no solo em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 10-20 cm.

2012/13, na profundidade de 10-20 cm.			
P cobertura	Manejo na entressafra		
	Braquiária	Pousio	Média
	----- Mg (mmol _c dm ⁻³) -----		
	10-20 cm		
Sem P	4,9 Aa	4,7 Aa	4,8
FNA	4,0 Ba	5,6 Aa	4,8
SFT	4,2 Aa	5,0 Aa	4,6
Média	4,4	5,1	4,8

*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Foi observada a típica distribuição de nutrientes que ocorre em áreas com semeadura direta estabelecida à longo tempo, com o acúmulo de matéria orgânica próximo da superfície do solo resultando em maior CTC, devido ao aumento das superfícies de carga no solo, e maior pH. Provavelmente isso ocorreu devido ao poder tampão da matéria orgânica e à maior concentração de bases trocáveis, Ca, Mg, e K, principalmente na camada de 0-5 cm, o que de uma forma geral revela a grande importância dessa primeira camada do solo para a nutrição das plantas em sistemas com baixo revolvimento do solo (DUIKER; BEEGLE, 2006; PAVINATO; ROSOLEM, 2008, PAVINATO et al., 2009a). Sem o revolvimento do solo, os resíduos vegetais dispostos na superfície do solo aumentam os valores de pH e teores de bases trocáveis, e reduzem os teores de Fe e Al, pois há complexação e troca dos íons H⁺ pelas bases trocáveis, resultando em aumento do V%, e atuando em um papel fundamental para a maior disponibilidade de P próximo à superfície do solo (HAFNER et al., 1993; FRANCHINI et al., 1999; FRANCHINI et al., 2001; CALONEGO; ROSOLEM, 2013). No presente estudo, todos esses benefícios da semeadura direta foram ainda mais pronunciados após o cultivo de braquiária do que no solo em pousio, em pelo menos uma das camadas avaliadas.

Para a análise de micro nutrientes no solo, não foram encontradas diferenças entre os teores de cobre em nenhuma das profundidades avaliadas, e sim um grande aumento da concentração de cobre de acordo com o aumento da profundidade no

perfil do solo, com valores médios de 1,27, 1,88, 2,00, e 2,10 mg dm⁻³, nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm, respectivamente.

Houve efeito isolado de cada um dos fatores avaliados para o teor de Fe na primeira camada do solo, sendo que as demais camadas não apresentaram diferenças para o teor de Fe. A aplicação de SFT a lanço não diferiu da aplicação de FNA quanto ao teor de Fe, mas foi maior que no tratamento sem aplicação, já aplicação de FNA não teve diferença no teor de P comparando com o tratamento sem P, os teores médios de Fe observados para os tratamentos com SFT, FNA, e sem P, foram 14,3, 13,3, e 13,1 mg dm⁻³, respectivamente. Quando foi cultivada a braquiária, o teor médio de Fe na primeira camada foi igual a 14,2 mg dm⁻³, e quando o solo foi mantido em pousio, 13,0 mg dm⁻³. O teor médio de Fe no tratamento com a dose 60 kg ha⁻¹ foi igual a 14,8 mg dm⁻³, e maior que a média dos tratamentos com a dose 30 e 0, igual a 13,1 mg dm⁻³. As camadas de 5-10, 10-20, e 20-40 cm apresentaram os seguintes valores médios de Fe: 17,4; 19,6; e 19,4 mg dm⁻³. O aumento do teor de cobre e ferro de acordo com o aumento da profundidade do solo está relacionado ao pH, pois a disponibilidade desses nutrientes catiônicos aumenta com a redução do pH (LINDSAY, 1979).

O teor de Mn foi menor quando não houve aplicação de P a lanço, com média de 8,6 mg kg⁻¹, enquanto que as aplicações de FNA e SFT resultaram em teores de 9,5 e 9,6 mg kg⁻¹, na primeira camada do solo. A primeira camada também apresentou interação do cultivo de braquiária e o efeito residual das doses de P na semeadura da soja, e essa interação também ocorreu na última camada (Tabela 11). Na primeira camada, foi observado que após o pousio há efeito das doses de P, sendo maior o teor de Mn quando foi aplicada a maior dose de P, e o teor de Mn também é maior após pousio do que após o cultivo de braquiária quando foi aplicada a maior dose de P. Na última camada, o teor de Mn é menor quando foi aplicado a maior dose de P na semeadura da soja, apenas quando houve o cultivo de braquiária.

A segunda camada não apresentou diferenças no teor de Mn para nenhum dos fatores avaliados, tendo em média 7,4 mg kg⁻¹. Já a terceira camada, 10-20 cm, apresentou interação das fontes de P aplicadas em cobertura e das doses de P na semeadura da soja, assim como a última camada (Tabela 12). Na camada de 10-20 cm, não houve efeito das fontes de P aplicadas a lanço para cada dose de P na semeadura, mas o teor de Mn foi maior quando não houve adubação fosfatada de semeadura. Na última

camada, o teor de Mn foi maior após aplicações de FNA quando não houve adubação de P na semeadura.

Tabela 11 - Teores médios de Mn no solo em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 20-40 cm.

Braquiária	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
----- Mn (mg kg ⁻¹) -----				
0-5 cm				
Com	8,9 Aa	9,8 Aa	8,9 Ab	9,2
Sem	8,8 Ba	9,0 Ba	10,0 Aa	9,3
Média	8,9	9,4	9,4	9,2
20-40 cm				
Com	7,2 Aa	7,0 Ba	5,7 Ca	6,6
Sem	6,2 Ab	6,6 Aa	6,3 Aa	6,4
Média	6,7	6,8	6,0	6,5

*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 12 - Teores médios de Mn no solo em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 10-20 e 20-40 cm.

P cobertura	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
----- Mn (mg kg ⁻¹) -----				
10-20 cm				
Sem P	8,9 Aa	8,1 ABa	7,3 Ba	8,1
FNA	8,6 Aa	7,5 ABa	6,6 Ba	7,6
SFT	7,5 Aa	8,1 Aa	8,0 Ba	7,9
Média	8,3	7,9	7,3	7,9
20-40 cm				
Sem P	6,7 Ab	6,8 Aa	6,0 Aa	6,5
FNA	6,9 Aa	6,3 Ba	6,0 Ba	6,4
SFT	6,5 Ab	5,9 Aa	6,5 Aa	6,3
Média	6,7	6,3	6,2	6,4

*Médias seguidas pela mesma letra, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não houve interação dos fatores avaliados para o teor de zinco no solo. O teor de zinco foi menor após o cultivo de braquiária, $0,31 \text{ mg kg}^{-1}$, do que quando o solo foi mantido em pousio $0,37 \text{ mg kg}^{-1}$, apenas na última camada do solo, e nessa mesma camada de solo, também foi menor quando não houve adubação fosfatada na semeadura da soja, $0,31 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto que as adubações com as doses 30 e 60 resultaram nos teores $0,37$ e $0,35 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente. Houve um grande acúmulo de Zn na primeira camada do solo, com teor médio de $1,33 \text{ mg kg}^{-1}$. O acúmulo de zinco nas primeiras camadas do solo cultivado sob semeadura direta é atribuído à deposição de resíduos vegetais na superfície do solo (HARGROOVE et al., 1982).

6.3 Análise de fracionamento do fósforo

6.3.1 P RTA

Não houve interação dos fatores analisados para o teor de P extraído com a RTA, e as duas formas de adubação proporcionaram diferenças nos teores de P até 20 cm de profundidade. Esses resultados não são semelhantes aos obtidos com a extração de P pela resina seguindo o método de Van Raij et al. (1991), e que foram apresentados no item 6.2.1, em que foi observado interação desses dois fatores. Os teores de P foram maiores com a aplicação de SFT do que FNA nas duas primeiras camadas, e na terceira camada apenas o tratamento sem aplicação de P em cobertura resultou em menor teor de P (Tabela 13), mas na análise de rotina, as aplicações de SFT resultaram em menor efeito residual do que o FNA na primeira camada do solo. Além disso, os teores de P obtidos com a RTA na análise de fracionamento foram bem menores do que os teores obtidos na análise de rotina, isso se deve à forma de fita da RTA que proporciona menor área superficial em contato com a solução do solo do que a resina utilizada na análise de rotina, em forma de pequenas esferas.

Tabela 13 - Teores médios de P no solo, extraído com resina de troca aniônica (P RTA), em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- P RTA (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	9,5 B	12,0 B	17,6 A	13,0
5-10	5,6 B	6,4 B	9,3 A	7,1
10-20	2,4 B	3,5 AB	4,6 A	3,5

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O cultivo de braquiária modificou o teor de P extraído pela RTA apenas na primeira camada de solo, quando comparado com a média dos tratamentos em pousio na entressafra de soja (Tabela 14). Os resíduos dos vários cultivos de braquiária aumentam a disponibilidade de P devido à liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição do material vegetal pela população microbiana, e esses ácidos competem com os sítios de adsorção no solo, aumentando a disponibilidade dos fosfatos no solo (JONES, 1998; HU et al., 2005; PAVINATO et al., 2008).

Tabela 14 - Teores médios de P no solo, extraído com resina de troca aniônica (P RTA), em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.

Profundidade (cm)	Manejo na entressafra		Média
	Braquiária	Pousio	
	----- P RTA (mg kg ⁻¹) -----		
0-5	14,0 A	12,1 B	13,0

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As aplicações de 60 e 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na semeadura de soja proporcionaram um teor de P extraído com a RTA semelhante na primeira camada do solo. Na segunda e terceira camada, o teor de P foi maior com a maior dose do que com a dose 30 kg ha⁻¹, e para essa não teve diferenças entre a ausência de adubação fosfatada na semeadura da soja (Tabela 15). Assim como o observado por Pavinato et al. (2009b), o aumento do teor das frações lábeis, moderadamente lábeis e às vezes das pouco lábeis, via adição de fertilizantes, se dá principalmente com a adição de doses altas.

Tabela 15 - Teores médios de P no solo, extraído com resina de troca aniônica (P RTA), em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em quatro profundidades, 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm.

Profundidade (cm)	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
	----- P RTA (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	11,0 B	13,6 A	14,6 A	13,0
5-10	4,8 B	6,6 B	9,8 A	7,1
10-20	2,8 B	3,0 B	4,7 A	3,5

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não houve efeito de nenhum dos fatores avaliados no teor de P extraído com a RTA na última camada do solo, e o teor médio dessa fração de todas as unidades experimentais foi igual à 1,8 mg kg⁻¹.

6.3.2 P NaHCO₃

Houve interação das aplicações de P a lanço e o manejo na entressafra para o teor de P total extraído com NaHCO₃ na primeira camada do solo. O teor de P lábil total, correspondente à soma das frações orgânicas e inorgânicas extraídas com bicarbonato de sódio foi maior na primeira camada do solo cultivado com a braquiária quando houve adubação fosfatada com SFT (Tabela 16). Apesar da maior disponibilidade desta forma de P após o cultivo da braquiária, é pequena a participação dessa fração em relação ao P total do solo, cerca de 3,2%, semelhante ao obtido por Lilienfein et al. (2000) em solos oxidícos, pois as forças que atuam no sentido da adsorção do P são bastante elevadas, e não permitem que altos teores de P lábil sejam mantidos no solo por muito tempo.

Tabela 16 - Teores médios de P total, extraído com NaHCO_3 , em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na camada de 0-5 cm.

P cobertura	Manejo na entressafra		Média
	Braquiária	Pousio	
	----- Pt NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----		
	0-5 cm		
Sem P	12,0 Ab	11,6 Aa	11,8
FNA	13,0 Ab	11,9 Aa	12,4
SFT	22,1 Aa	15,3 Ba	18,7
Média	15,7	12,9	14,3

*Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Houve efeito das adubações fosfatadas na linha de semeadura da soja até 10 cm de profundidade sobre o teor de Pt extraído com NaHCO_3 , sendo que a adubação com a dose de 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 no sulco de semeadura resultou em maior teor de P do que as outras doses (Tabela 17).

Tabela 17 - Teores médios de P total, extraído com NaHCO_3 , em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Doses de P na semeadura (kg ha^{-1} de P_2O_5)			Média
	0	30	60	
	----- Pt NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
0-5	13,4 B	13,0 B	16,6 A	14,3
5-10	8,1 B	9,3 B	13,1 A	10,2

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A adubação fosfatada com SFT em cobertura proporcionou maior teor de P lábil total na segunda camada do solo do que a adubação com FNA, e este por sua vez não teve diferença do tratamento sem adubação fosfatada (Tabela 18). Nas camadas de 10-20 e 20-40 cm não houve diferenças no teor de P lábil para nenhum dos fatores avaliados, sendo os teores médios iguais à $7,3$ e $5,9 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 18 - Teores médios de P total, extraído com NaHCO_3 , em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Pt NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
5-10	9,4 B	9,4 B	11,7 A	10,2

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não foram observadas diferenças na média dos teores de P entre os tratamentos com e sem braquiária quando se analisa apenas a parte inorgânica do P extraído com NaHCO_3 , mas foram observadas diferenças entre as fontes de P aplicadas a lanço (Tabela 19) e entre as doses de P na semeadura (Tabela 20) para o teor de P inorgânico extraído com NaHCO_3 até 10 cm de profundidade. Merlin et al. (2013) observou aumento de formas de P mais disponíveis após o cultivo de *B. ruziziensis* por apenas 7 meses, tanto para as frações extraídas com RTA, quanto para as frações orgânicas e inorgânicas extraídas com NaHCO_3 , na camada de 0-5 cm, e verificou que a disponibilidade de P após braquiária ocorreu apenas com as aplicações de fosfatos em cobertura pouco antes da semeadura da braquiária.

Tabela 19 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaHCO_3 , em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5 e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Pi NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
0-5	8,6 B	8,9 B	10,4 A	9,3
5-10	7,1 B	7,5 B	8,2 A	7,6

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 20 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaHCO_3 , em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Doses de P na semeadura (kg ha^{-1} de P_2O_5)			Média
	0	30	60	
	----- Pi NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
0-5	8,5 B	9,3B	10,1 A	9,3
5-10	7,1 B	7,4 B	8,3 A	7,6

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não houve diferenças para os teores de P inorgânico extraído com NaHCO_3 nas camadas de 10-20 e 20-40 cm, sendo que as médias encontradas foram 6,9 e 6,1 mg kg^{-1} , respectivamente.

Nem mesmo a fração orgânica extraída com NaHCO_3 foi afetada pelo cultivo de braquiária. Diversos trabalhos relatam a maior participação do P orgânico no P total do solo (CONDRON et al., 2005), principalmente devido à sistemas de manejo que visam a manutenção e aumento do teor de matéria orgânica no solo, que contribuem significativamente na disponibilidade de P e determinação da produtividade das culturas (SIMPSON, 2012). Porém, o efeito do cultivo da braquiária sobre o aumento da disponibilidade do P lábil extraído com NaHCO_3 só pode ser observado quando foi somada a fração inorgânica com a orgânica, correspondendo ao Pt NaHCO_3 , pois as pequenas diferenças, proporcionadas pela braquiária, entre as médias para as frações analisadas individualmente foram elevadas na análise das frações em conjunto.

Contudo, houve diferenças nos tratamentos com adubação fosfatada à lanço e na semeadura da soja. O teor de P orgânico extraído com o bicarbonato de sódio foi maior na camada de 0-5 cm das parcelas que receberam a adubação de SFT em cobertura (Tabela 21), a dose de 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 também contribuiu para o aumento do teor dessa fração de P na camada de 0-5 cm de profundidade, e na camada de 5-10 cm, as doses 30 e 60 kg ha^{-1} não apresentaram diferenças entre si (Tabela 22).

Tabela 21 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaHCO_3 , em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Po NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
0-5	4,8 B	5,0 B	9,2 A	6,4

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 22 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaHCO_3 , em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Doses de P na semeadura (kg ha^{-1} de P_2O_5)			Média
	0	30	60	
	----- Po NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
0-5	6,0 B	5,2 B	7,9 A	6,4
5-10	2,6 B	5,1 A	5,4 A	4,3

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As camadas de 10-20 e 20-40 cm apresentaram valores médios de P lábil orgânico iguais a 2,7 e 2,3 mg kg^{-1} , respectivamente.

Diversos autores indicam que os fosfatos extraídos pela RTA e pelo bicarbonato de sódio correspondem à mesma forma de P no solo, o P lábil em equilíbrio com o P da solução do solo (GONÇALVES; MEURER, 2009; BLAKE et al., 2003; REDEL et al., 2007; PAVINATO et al., 2009b), e por isso essas frações extraídas no método de fracionamento foram analisadas juntamente. Mesmo somando essas duas frações de P, o valor obtido nem sempre foi próximo ao teor de P extraído na análise de rotina. Isso ocorreu principalmente na primeira camada do solo, onde os teores de P da análise de rotina são maiores para os solos das parcelas que receberam adubação a lanço e a maior dose de P na linha de semeadura, já as amostras que possivelmente possuem menos P, os teores da análise de rotina e da soma do P RTA e Pt NaHCO_3 são bastante semelhantes.

Houve efeito residual da aplicação de SFT em cobertura na soma das frações extraídas com RTA e NaHCO_3 até 10 cm de profundidade (Tabela 23), assim como o efeito das adubações com dose de 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 até 10 cm de profundidade (Tabela 24).

Tabela 23 - Teores médios de P extraído com RTA somado ao P extraído com NaHCO_3 , em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- P RTA + Pt NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
0-5	21,3 B	24,5 B	36,4 A	27,4
5-10	15,1 B	15,8 B	20,6 A	17,2

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Tabela 24 - Teores médios de P extraído com RTA somado ao P extraído com NaHCO_3 , em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha^{-1} de P_2O_5), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Doses de P na semeadura (kg ha^{-1} de P_2O_5)			Média
	0	30	60	
	----- P RTA + Pt NaHCO_3 (mg kg^{-1}) -----			
0-5	24,4 B	26,6 B	31,1 A	27,4
5-10	12,9 B	15,6 B	22,9 A	17,2

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O cultivo de braquiária proporcionou maior teor de P lábil na primeira camada de solo (Tabela 25), como já observado na análise individual das frações de P extraídas com a RTA e com NaHCO_3 , enquanto que na segunda camada, 5-10 cm, a probabilidade de não serem encontradas diferenças para o teor de P entre os tratamentos com e sem braquiária foi de 8%. Nas duas últimas camadas, 10-20 e 20-40 cm, os teores médios de P extraídos com RTA e NaHCO_3 foram iguais a 10,7 e 7,0 mg kg^{-1} , respectivamente.

Tabela 25- Teores médios de P extraído com RTA mais o P extraído com NaHCO_3 , em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.

Profundidade (cm)	Manejo na entressafra		Média
	Braquiária	Pousio	
	----- P RTA (mg kg^{-1}) -----		
0-5	29,6 A	25,1 B	27,4

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Silva et al. (1997) demonstraram que a capacidade máxima de adsorção do P no solo é reduzida com o cultivo de braquiária *ruziziensis*, sendo menor apenas que no solo sob vegetação nativa do Cerrado, enquanto que a adsorção máxima foi obtida em solo mantido sem cultivo. Provavelmente a redução da capacidade máxima de adsorção se dá com a liberação de ácidos orgânicos no solo (HU et al., 2005) pelas raízes da braquiária. Ainda são necessários estudos que demonstrem a exsudação de ácidos orgânicos por plantas de *B. ruziziensis*, pois apesar de já ter sido divulgado a exsudação de ácidos em função do teor de Al, não se sabe qual é a resposta dessas plantas na liberação de ácidos orgânicos quando há deficiência de P no solo (WENZL et al., 2001). Possivelmente a redução da capacidade máxima de adsorção de P em solo cultivado com a braquiária resultou na conservação de formas bastante lábeis e livres na solução do solo nas duas primeiras camadas.

6.3.3 P NaOH 0,1

Houve diferenças significativas para as médias de teor de P total extraído com hidróxido de sódio na concentração 0,1 mol L⁻¹, na primeira camada do solo (Tabela 26), entre os tratamentos com e sem braquiária. Os teores dessa fração de P foram bastante altos, e apesar de que o P extraído por NaOH 0,1M representar o P ligado ao Fe e Al, e algumas vezes ser interpretada como um dreno para o P, a energia dessa ligação do P com Fe e Al ainda não é tão forte, e por isso o P dessa fração é considerado moderadamente lábil, e portanto, manter o teor dessa fração em um nível elevado é importante para manter o suprimento de P para as plantas (GUO; YOST, 1998; OLIBONE; ROSOLEM, 2010).

Tabela 26 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,1M, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.

Profundidade (cm)	Manejo na entressafra		Média
	Braquiária	Pousio	
	----- Pt NaOH 0,1 (mg kg ⁻¹) -----		
0-5	100,2 A	91,0 B	95,6

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não houve diferenças para o teor de P moderadamente lábil em função das doses de P aplicadas na semeadura da soja. A média do teor de P total extraído

com NaOH 0,1 mol L⁻¹ no tratamento com aplicação superficial de SFT foi superior ao tratamento com FNA e sem P na primeira e segunda camada de solo. Não houve diferenças entre os tratamentos com aplicação de FNA em cobertura e ausência de aplicação para os teores dessa mesma fração de P (Tabela 27). Resultados semelhantes foram observados por Olibone e Rosolem (2010), que apesar de terem adotado um diferente método de fracionamento de P, também notaram que fração de P ligado ao Fe foi maior com a aplicação de SFT do que FNA.

Tabela 27 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,1M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Pt NaOH 0,1 (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	81,1 B	87,0 B	118,8 A	95,6
5-10	71,3 B	79,2 B	96,7 A	82,4

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O SFT é prontamente solúvel no solo e por isso tem alta eficiência em fornecer P para as plantas, no entanto esse mesmo P pode ser prontamente convertido em P insolúvel após reações com os minerais do solo. No caso de solos ácidos, o P da solução é rapidamente adsorvido na superfície dos óxidos de Fe e Al (SYERS et al. 2008), o que explica a grande concentração da fração de P total extraída com NaOH 0,1 mol L⁻¹ no presente estudo, correspondendo em média à 22%, do total de P extraído no fracionamento, para a camada de 0-5 cm. Gonçalves e Meurer (2009) também observaram que o P adicionado pelos fertilizantes aumentam principalmente o P das frações extraídas com NaOH 0,1 mol L⁻¹.

A forma dominante de P em solos ácidos e altamente intemperizados é a forma ligada aos óxidos de Fe e Al (PARFITT, 1978; LINDSAY, 1979; LILIENFEIN et al., 2000), sendo que já foi observado teores que representam mais de 40% do P total do solo (REDEL et al., 2007). O P residual foi a única fração com participação maior do que a soma das frações orgânicas e inorgânicas de P moderadamente lábil ligado ao Fe e Al, representando cerca de 52% do P total do solo na camada de 0-5 cm. A digestão do solo na última etapa do fracionamento é capaz de extrair diversas

formas de P ligadas aos componentes do solo, dentre essas formas há também formas de P associadas ao Fe e Al, mas com alta estabilidade de ligação e, portanto, consideradas fixadas ao Fe e Al (GATIBONI et al., 2007).

Apesar de ter ocorrido um decréscimo na participação do P inorgânico e orgânico moderadamente lábil ligado ao Fe e Al de acordo com o aumento da profundidade no perfil do solo, houve aumento da participação do P residual, representando até 73% do P total na camada de 20-40 cm. A máxima adsorção de P nos óxidos de Fe e Al ocorre em pH próximo de 4 (LINDSAY, 1979), uma situação comum a partir da terceira camada de solo dentre todas as amostras analisadas, sendo que o pH na faixa entre 20-40 cm alcançou um valor médio de 4,1 (Tabela 3), o que resulta em aumento do processo de fixação do P. Nessa camada de 20-40 cm há também menor teor de bases trocáveis no solo e aumento da disponibilidade de Fe e Al, o que contribuem para o processo de fixação (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Dessa forma, o decréscimo do P moderadamente lábil ligado ao Fe e Al, ocorreu provavelmente em função da transformação dessas formas moderadamente lábeis para formas de P fixado, representado pela fração denominada de P residual. Os teores médios de P moderadamente lábil, ligado ao Fe e Al, nas camadas de 10-20 e 20-40 cm, são 66,4 e 44,4 mg kg⁻¹, respectivamente.

O teor da fração de P inorgânico adsorvido aos óxidos de Fe e Al não foram alterados pelo cultivo de braquiária. Já as aplicações de SFT em cobertura proporcionaram maior teor dessa fração até a camada de 10-20 cm (Tabela 28).

Tabela 28 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaOH 0,1M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Pi NaOH 0,1 (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	24,2 B	27,0 B	37,2 A	29,5
5-10	21,8 B	24,5 B	29,3 A	25,2
10-20	19,1 B	20,7 B	23,9 A	21,2

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

As adubações no sulco de semeadura elevaram o teor de P inorgânico até 10 cm de profundidade (Tabela 29), e assim como o observado por Pavinato

et al. (2008), isto indica que grande parte do P aplicado via fertilizantes é transformado em formas moderadamente lábeis. Sem o revolvimento do solo, o acúmulo de P nas camadas mais superficiais do solo permite que os sítios de troca com alta afinidade pelos fosfatos sejam mais preenchidos e gradualmente saturados, reduzindo a energia de ligação e aumentando a disponibilidade de P no solo (SILVA et al., 1997; RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2003; TIECHER et al., 2012). Além disso, essa fração de P extraída com NaOH 0,1M deve ser considerada responsável por suprir o P da solução do solo a medida que este seja absorvido pelas plantas (GAHOONIA et al., 2000; PAVINATO et al., 2008).

Tabela 29 - Teores médios de P inorgânico, extraído com NaOH 0,1M, em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidade, 0-5 e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
	----- Pi NaOH 0,1 (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	26,7 B	30,5 A	31,2 A	29,5
5-10	23,0 B	24,9 B	27,6 A	25,2

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A última camada de solo não apresentou diferenças para o teor de P inorgânico extraído com NaOH 0,1M, e a média correspondente à essa camada foi de 18,2 mg kg⁻¹.

A fração de P orgânico extraída com NaOH 0,1M foi superior até 20 cm nas parcelas que receberam SFT a lanço (Tabela 30). Mais uma vez, ressalta-se a hipótese de que o maior teor de P em profundidade se deve à ação das raízes, que translocam o P disponível na camada mais próxima da superfície, que recebeu a adubação fosfatada, para as camadas mais profundas do solo (ANGHINONI, 2007). Nesse caso, a decomposição das raízes liberam formas orgânicas de P, e a mineralização dessas formas de P elevam o teor de P inorgânico nas camadas mais profundas do solo. A aplicação de SFT resultou em maior produtividade dos cultivos anteriores (JANEGITZ, 2012; MERLIN et al., 2013), promovendo maior acúmulo de matéria seca de parte aérea e possivelmente de raízes, o que pode ter favorecido o aumento do P orgânico no solo (OLIBONE; ROSOLEM, 2010).

Tabela 30 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaOH 0,1M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em três profundidades, 0-5, 5-10, e 10-20 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Po NaOH 0,1 (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	24,2 B	27,0 B	37,2 A	29,5
5-10	21,8 B	24,5 B	29,3 A	25,2
10-20	19,1 B	20,7 B	23,9 A	21,2

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não houve efeito do cultivo de braquiária e nem das doses de P na semeadura da soja sobre o teor de P orgânico moderadamente lábil, ligado ao Fe e Al, em nenhuma das camadas avaliadas. A última camada apresentou média de 26,3 mg kg⁻¹ dessa fração de P.

6.3.4 P HCl

Houve efeito do fator adubação de P em cobertura para a fração de P ligada ao cálcio, extraída com ácido clorídrico, até 10 cm de profundidade. Nesse caso, a aplicação de FNA a lanço proporcionou um teor bem maior do que o SFT na primeira e na segunda camada do solo (Tabela 31). Assim como o observado por Galvani et al. (2008) e Olibone e Rosolem (2010), o aumento do P ligado ao cálcio se deve à composição dos fertilizantes aplicados, sendo que o FNA contém cerca de 36% de cálcio enquanto que o SFT contém 13%. Além disso, houve uma aplicação de calcário para correção da acidez do solo no ano de 2010, sem incorporação, o que pode ter desfavorecido a solubilização do FNA aplicado logo em seguida, e possivelmente favoreceu a neoformação de fosfatos de cálcio de baixa solubilidade, devido ao alto teor de P e Ca próximo da superfície do solo, semelhante ao observado por Tiecher et al. (2012).

Tabela 31 - Teores médios de P extraído com HCl, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- P HCl (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	14,1 B	46,0 A	20,4 B	26,8
5-10	10,4 B	20,2 A	13,1 B	14,6

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De acordo com Guo e Yost (1998) o P ligado ao cálcio pode se tornar mais disponível com a redução do pH, ou redução dos teores de Ca e P do solo, o que pode ocorrer em camadas mais profundas do solo, na rizosfera, ou em solos pobres em Ca e ricos em Fe e Al. Pavinato et al., (2009) e Lilienfein (2000) verificaram o efeito da semeadura direta sob a palhada em solos de Cerrado, e apontaram que os baixos teores de P ligado ao Ca observados nesses solos indicam que o P foi preferencialmente adsorvido aos óxidos de Fe e Al.

O cultivo de braquiária não foi capaz de reduzir essa fração de P, provavelmente devido à dificuldade das raízes em se aproximar dessa forma de P pouco solúvel e depositada na superfície do solo, onde o pH da primeira camada teve um valor médio de 5,9. Também não houve efeito da adubação fosfatada na semeadura em nenhuma das camadas de solo. As camadas de 10-20 e 20-40 cm apresentaram os seguintes teores médios de P ligado ao Ca, 8,0 e 5,4 mg kg⁻¹, respectivamente.

6.3.5 P NaOH 0,5

Houve interação da adubação fosfatada em cobertura e do cultivo de braquiária para o teor de P ocluso na primeira camada de solo, sendo que o teor dessa fração foi maior nas parcelas que receberam a adubação fosfatada a lanço e não foram cultivadas com braquiária, independente da fonte de P aplicada. O teor de P também foi maior após o cultivo de braquiária apenas quando não houve adubação fosfatada em cobertura (Tabela 32).

Tabela 32 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,5M, em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e presença e ausência de braquiária, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 0-5 cm.

P cobertura	Manejo na entressafra		Média
	Braquiária	Pousio	
	----- Pt NaOH 0,5 (mg kg ⁻¹) -----		
	0-5 cm		
Sem P	57,0 Aa	41,5 Bb	49,3
FNA	66,1 Aa	67,3 Aa	66,7
SFT	59,2 Aa	59,0 Aa	59,1
Média	60,8	56,0	58,4

*Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na camada de 5-10 cm não houve interação, mas o teor foi elevado nas parcelas que receberam fertilizantes fosfatados a lanço (Tabela 33). A menor concentração do P pouco lábil na camada de 0-5 cm do solo cultivado com braquiária é o resultado da ciclagem do P realizada por essas plantas em sistema de rotação, resultando em distribuição do P em outras camadas do solo ou em transformação da forma de P ocluso em formas mais lábeis. Além disso, o teor de matéria orgânica na primeira camada é maior após o cultivo de braquiária, o que resulta em redução da capacidade adsortiva de P do solo (ALMEIDA et al., 2003).

Tabela 33 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,5M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Pt NaOH 0,5 (mg kg ⁻¹) -----			
5-10	39,7 B	50,4 A	45,7 AB	45,3

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O trabalho desenvolvido por Olibone e Rosolem (2010) foi realizado na mesma área experimental, e avaliou as formas de P em solo sob semeadura direta em função da adubação fosfatada, e relata a ausência de diferenças entre os teores de P ocluso de acordo com as fontes de P aplicadas a lanço, FNA e SFT. No entanto, 5 anos

após a última aplicação dessas fontes de P, é possível observar que a dinâmica do P foi diferente entre as fontes aplicadas, sendo que o FNA proporcionou maior teor de P ocluso do que o SFT, na camada de 5-10 cm. Na camada de 10-20 cm, nenhum dos fatores resultaram em diferenças, e o teor médio de P total extraído com NaOH 0,5M foi de 36,9 mg kg⁻¹.

Na camada de 20-40 cm houve maior teor de P ocluso após o cultivo de braquiária do que no solo mantido em pousio (Tabela 34). O aumento do P ocluso nesse caso pode ser resultado de pelo menos duas hipóteses, a maior disponibilidade de P promovida pela braquiária favorece o processo de fixação do P em formas menos lábeis, ou o cultivo de braquiária possibilitou a redução de uma forma ainda menos lábil, no caso a fração representada pelo P residual, e assim o P passou para essa forma oclusa, pouco lábil.

Tabela 34 - Teores médios de P total, extraído com NaOH 0,5M, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 20-40 cm.

Profundidade (cm)	Manejo na entressafra		Média
	Braquiária	Pousio	
	----- Pt NaOH 0,5 (mg kg ⁻¹) -----		
20-40	32,9 A	29,8 B	31,4

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Não houve diferença nos teores da fração inorgânica de P ocluso, em nenhuma das profundidades. Os teores de P inorgânico foram bastante semelhantes entre as camadas avaliadas, 16,0, 14,3, 13,7, e 14,5 mg kg⁻¹, para as camadas 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm, respectivamente, enquanto que a fração orgânica apresentou uma distribuição menos homogênea no perfil, com maior concentração próxima da superfície. A fração orgânica foi alterada significativamente pela aplicação de P em cobertura, até 10 cm de profundidade (Tabela 35). Não houve efeito dos outros fatores em nenhuma das camadas, e os valores médios de P orgânico pouco lábil para as camadas 10-20 e 20-40 cm foram 22,1 e 17,1 mg kg⁻¹, respectivamente.

Tabela 35 - Teores médios de P orgânico, extraído com NaOH 0,5M, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- Po NaOH 0,5 (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	33,6 B	51,6 A	42,5 AB	42,5
5-10	25,1 B	35,0 A	32,0 A	30,7

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Apesar do acúmulo das frações de P nas primeiras camadas do solo em função das aplicações de P na superfície e na linha de semeadura, houve uma redistribuição do P no perfil, principalmente com o cultivo de braquiária e até a camada de 10-20 cm. As parcelas que não receberam adubação fosfatada, nem em cobertura e nem no sulco de semeadura, em que foram cultivadas com braquiária, apresentaram em média os seguintes teores de P resina: 15, 6, 5, e 3 mg dm⁻³ nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, respectivamente, e a soma das frações orgânicas representam 57, 55, 49, e 41% das frações extraídas na análise de fracionamento, sem considerar o P residual. Quando não houve o cultivo de braquiária, os teores de P resina para as mesmas camadas foram: 21, 9, 5, e 3, e a participação do P orgânico correspondeu à 51, 57, 62, e 53%, respectivamente. Enquanto que, as parcelas que receberam SFT em cobertura, e a dose de 60 kg ha⁻¹ em cultivos anteriores de soja, apresentaram os seguintes teores: 58, 34, 15, e 5 mg dm⁻³, com as respectivas participações do P orgânico: 53, 52, 52, e 45%, de acordo com o aumento da profundidade no solo, quando foram cultivadas com braquiária. E quando não houve o cultivo de braquiária, os teores de P resina da primeira camada até a última, foram: 52, 24, 11, e 4 mg dm⁻³, sendo que a participação do P orgânico para as respectivas camadas foi: 56, 58, 57, e 59%.

De acordo com Galvani et al. (2008) a redistribuição do P no perfil do solo se dá com as frações de P orgânico, como uma consequência da decomposição dos resíduos das plantas e das raízes. Mas, ao contrário do que se esperava, a participação do P orgânico nas duas últimas camadas foi maior para os tratamentos mantidos em pousio do que quando cultivados com a braquiária.

A maior participação do P inorgânico após o cultivo de braquiária, também deve ocorrer devido aos ácidos orgânicos, exsudados pelas raízes, ou produzidos

pelos microorganismos na decomposição dos materiais orgânicos nessas camadas, e mineralização do P orgânico tornando o P inorgânico mais disponível (JONES, 1998; BAYER; MIELNICZUK, 1999; PAVINATO et al., 2008). Nziguheba et al. (2000) verificaram que é pequeno o acréscimo da fração orgânica de P no solo, mesmo quando é feita apenas aplicações de resíduos vegetais no solo, pois o aumento da biomassa microbiana e consumo do P pelas plantas são responsáveis pela maior taxa de mineralização do P orgânico. A atividade microbiana e a liberação de enzimas fosfatases pelas raízes de braquiária são as principais formas de mineralização do P orgânico (DUFF et al., 1994). A atividade microbiana é maior sob o cultivo de braquiária ruziziensis (BARROTI; NAHAS, 2000; JANEGITZ, 2012), e com maior atividade microbiana a mineralização do P orgânico é acelerada (STEWART; TIESSEN, 1987). Também tem sido observada a alta atividade de fosfatase ácida por raízes de braquiária ruziziensis (LOUW-GAUME, et al. 2010), e em áreas cultivadas com semeadura direta (REDEL et al., 2007). Além disso, Troeh e Thompson (2005) apontam que o P orgânico também pode ser dissolvido quimicamente se o pH do meio for alto. A maior disponibilidade das frações de P após o cultivo de braquiária ocorreu principalmente na camada de 0-5 cm, onde o pH do solo é alto. Portanto, a menor participação do P orgânico sobre o cultivo de braquiária pode ter resultado da maior mineralização dessa fração.

Independente do cultivo de braquiária, a soma das frações orgânicas nas duas primeiras camadas foi alta, e representaram pouco mais de 50% das frações extraídas no fracionamento, quando o P residual não é considerado. Almeida et al. (2003) também observaram que as frações orgânicas possuem uma elevada participação no P total em Latossolos. De acordo com Cross e Schlesinger (1995) e Gatiboni et al. (2007), as plantas que crescem em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, são mais dependentes do P orgânico, pois esses solos possuem pouco P disponível para as plantas e a maior parte do P inorgânico é encontrada fixada aos óxidos de Fe e Al.

6.3.6 P Residual

A fração de P residual, extraída com a digestão do solo após todas as outras extrações, foi maior nas duas primeiras camadas do solo com a adubação fosfatada a lanço, sendo que na primeira camada as duas fontes proporcionaram um teor de P residual semelhante, mas na segunda camada a aplicação de SFT resultou em maior teor de P residual (Tabela 36).

Tabela 36 - Teores médios de P residual extraído com digestão nitroperclórica, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- P Residual (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	200,3 B	229,8 A	242,0 A	224,0
5-10	242,9 B	249,4 B	285,4 A	259,3

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O cultivo de braquiária reduziu a fração de P residual na camada de 10-20 cm quando comparado com o tratamento em pousio (Tabela 37), demonstrando a possibilidade de reverter a adsorção de P e demonstrando que o P não é fixado irreversivelmente mesmo em solo típico de regiões tropicais (GATIBONI et al., 2007; SYERS et al., 2008). Essa fração é a menos acessível para as plantas, sendo que apenas espécies adaptadas à condições de baixa disponibilidade de P são capazes de reduzir a concentração do P residual. Guo e Yost (1998) avaliaram as formas de P durante 14 cultivos consecutivos de milho em rotação com soja em solos intemperizados, e notaram que essas espécies foram capazes de: acessar apenas as formas mais lábeis de P, não foram capazes de alterar as frações moderadamente lábeis, e possibilitaram o acúmulo de P na fração residual, demonstrando a baixa eficiência dessas espécies em aproveitar o P adicionado no solo.

Tabela 37 - Teores médios de P residual extraído com digestão nitroperclórica, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, na profundidade de 10-20 cm.

Profundidade (cm)	Manejo na entressafra		Média
	Braquiária	Pousio	
	----- P Residual (mg kg ⁻¹) -----		
10-20	204,3 B	230,3 A	217,3

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A participação do P residual no P TOTAL do solo foi elevada de acordo com o aumento da profundidade do solo, a partir de 52% na primeira camada até 73% na camada de 20-40 cm. Além da menor atuação das raízes e menor teor de matéria

orgânica nas camadas mais profundas, há também aumento da participação de argilas na composição granulométrica do solo, sendo que na área experimental os teores de argila aumentam de 21 para 25% nas camadas de 0-5 e 20-40 cm do solo, respectivamente (Tabela 1). A menor porção de argilas reduz a adsorção de P e favorece o acúmulo de P em frações mais lábeis (CROSS; SCHLESINGER, 1995; RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2003). No entanto há a possibilidade de que o menor teor de P residual na primeira camada ocorre em função da maior dessorção do P do que da menor adsorção, devido aos diversos processos que promovem a liberação do P e que se concentram nas camadas mais superficiais do solo não revolvido.

O teor médio de P residual para cada camada sofreu uma grande variação, sendo observado valores de 224,0, 259,3, 217,3 e 242,6 mg kg⁻¹ nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, e 20-40 cm, respectivamente. É interessante observar um grande acúmulo da fração residual na camada de 5-10 cm, pois é nessa faixa de solo que é depositado os fertilizantes no sulco de semeadura. Apesar do acúmulo do P residual na camada de 5-10 cm, sua participação no P total do solo não é a maior nessa camada, pois a soma das outras frações de P resulta em um grande valor nessa camada.

6.3.7 P TOTAL

O somatório de todas as frações somado ao P residual revelou o efeito apenas da adubação fosfatada em cobertura nas camadas 0-5 e 5-10 cm, sendo que a adubação com SFT proporcionou maior teor de P nessas camadas (Tabela 38). Pavinato et al. (2009) observaram que o P total possui maior concentração até 15 cm de profundidade, devido aos vários anos de aplicação de fertilizantes, e uma redução gradual do P total em camadas mais profundas, semelhante ao observado no presente estudo. A concentração do P total é semelhante com a obtida em solos de cerrado por Lilienfein et al. (2000), porém é comum encontrar valores bem mais elevados para essa fração, principalmente em solos cultivados em regiões com clima temperado, onde os teores podem alcançar 3000 mg kg⁻¹ (FARDEAU, 1996; LAEGREID, 1999).

As camadas de 10-20 e 20-40 cm não apresentaram diferenças no teor de P residual para nenhum tratamento, e a média observada foi de 341,5 e 331,0 mg kg⁻¹, respectivamente.

Tabela 38 - Teores médios de P TOTAL, calculado com o somatório de todas as frações, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas antes da semeadura da soja, safra 2012/13, em duas profundidades, 0-5, e 5-10 cm.

Profundidade (cm)	Fontes de P em cobertura			Média
	Sem P	FNA	SFT	
	----- P TOTAL (mg kg ⁻¹) -----			
0-5	362,9 B	454,2 AB	483,5 A	433,5
5-10	385,3 B	415,0 AB	465,3 A	421,9

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No geral, apenas 10 a 20% do P adicionado é utilizado pelas plantas logo na mesma safra da aplicação, o restante do P utilizado é fornecido pelo solo (MOREL; FARDEAU, 1990; CHIEN et al., 2011), o que revela a grande importância da disponibilidade de P no solo para um adequado desenvolvimento e determinação da produtividade das culturas. De acordo com Fardeau (1996), o destino dos íons fosfatos adicionados na forma de fertilizantes depende mais das reações com os componentes do solo do que da eficiência de absorção das plantas cultivadas, e por isso a pesquisa em maximizar a absorção de P não deve resultar em avanços tão grandes na melhor eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados. Gahoonia et al. (2000) ainda reforça que o aumento da absorção de P só irá resultar em grandes avanços se estiver correlacionado à mecanismos que alterem a disponibilidade de P no solo.

Como a nutrição das plantas depende muito mais do P biodisponível em solos bastante intemperizados, alterações na taxa de liberação dos íons fosfatos por dessorção ou dissolução da fase sólida do solo para a solução do solo, e alterações na distribuição das formas de P para frações com menor estabilidade de ligação, resultam em maior ciclagem do P e são mais significativas para alcançar uma melhor eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados. O cultivo de braquiária *ruziziensis* no período de entressafra, sob semeadura direta em rotação com soja, se demonstrou uma técnica capaz de alterar a taxa de disponibilização do fósforo no solo, reduzindo a concentração de formas de P pouco disponíveis em camadas mais profundas do solo e aumentando a participação das formas lábeis e moderadamente lábeis em camadas mais próximas da superfície do solo.

6.4 Cultura da soja – safra 2012/13 e 2013/14

6.4.1 Cultivo da braquiária e a produtividade da soja

O peso de matéria seca de plantas de soja coletadas no estágio reprodutivo R_6 , no ano safra 2012/13 não foi afetado por nenhum dos fatores avaliados, sendo que o valor médio obtido para o peso de matéria seca de dez plantas foi igual a 175,1 g. Já a produtividade de grãos de soja teve diferenças para todos os fatores, sendo que houve interação das formas de aplicação de P, em cobertura e na semeadura, nos dois anos de avaliação.

Embora o cultivo de braquiária não tenha afetado o peso de matéria seca das plantas no estágio R_6 na safra de 2012/13, o número de estruturas reprodutivas, como vagens, foi reduzido enquanto que as estruturas vegetativas não, e por isso não houve diferenças no peso das plantas em R_6 . Apesar de que não foi realizada uma avaliação de número de vagens nesse estágio fenológico, a diferença do número de vagens foi anotada como uma observação de campo, e refletiu na produtividade de grãos, que foi menor quando houve rotação com braquiária.

No primeiro ano de cultivo da soja, a produtividade de grãos média de todos os tratamentos foi igual a 2760 kg ha⁻¹. A diferença de produtividade entre a média dos tratamentos com e sem braquiária, no primeiro ano, foi de aproximadamente 400 kg ha⁻¹. A produtividade da soja foi novamente afetada pela rotação com braquiária no ano safra 2013/14, sendo em média 100 kg ha⁻¹ menor do que no tratamento com pousio (Figura 3).

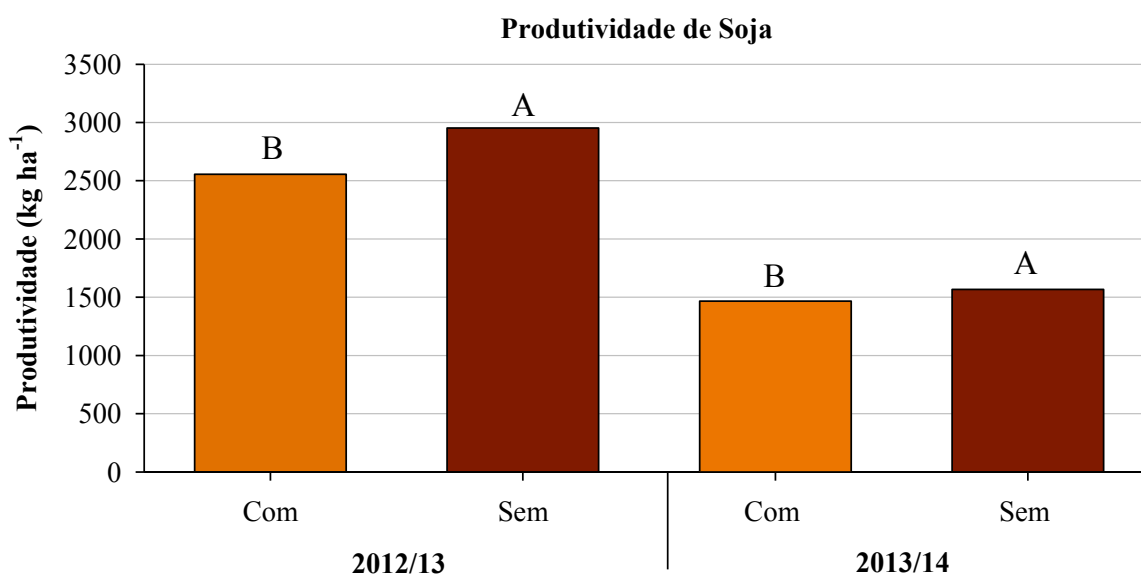


Figura 3 – Produtividade de grãos de soja na safra 2012/13 e 2013/14, média dos tratamentos com e sem braquiária na entressafra. Médias seguidas pela mesma letra, para cada ano safra, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O desenvolvimento da soja no ano safra 2013/14 foi bastante prejudicado pela baixa precipitação hídrica, com um total de 300 mm durante todo o desenvolvimento da cultura (Figura 1), e para agravar o déficit hídrico no solo, o período de entressafra na região de Botucatu é bastante característico pela falta de chuvas, o que resultou em um desenvolvimento inicial da soja ainda mais limitado. A exigência hídrica da cultura para alcançar uma adequada produtividade varia entre 450 e 700 mm de acordo com o ciclo de desenvolvimento de cada cultivar (DOORENBUS; KASSAM, 1979). Dessa forma, a produtividade média de grãos de soja no segundo ano foi de apenas 1516 kg ha⁻¹, cerca de duas vezes menor do que o obtido no cultivo anterior. Mas, apesar da deficiência hídrica, foi possível observar respostas significativas em função dos tratamentos aplicados, e semelhantes às obtidas no primeiro ano.

É possível que o cultivo de soja sobre a palhada de braquiárias afete negativamente a produtividade de soja, devido à imobilização de N em função da alta relação C/N da palhada da braquiária, ou também pela liberação de compostos alelopáticos durante a decomposição da palhada no período de germinação e emergência das plantas de soja, mas no presente experimento foi respeitado o período recomendado para o manejo químico de *B. ruziziensis* com o herbicida glifosato, entre 10 e 20 dias antes da semeadura da soja (NEPOMUCENO et al., 2012).

A produtividade da soja foi afetada negativamente pelo cultivo de *B. ruziziensis* pela primeira vez na safra 2012/13, após 6 anos da introdução desse sistema de rotação na área experimental, sendo que em outras safras o cultivo de braquiária também não favoreceu a produtividade da soja (JANEGITZ, 2012; MERLIN et al., 2013).

6.4.2 Aplicação de fertilizantes fosfatados e a produtividade da soja

Na interação dos fatores P cobertura e P semeadura para a produtividade da soja na safra 2012/13, observou-se efeito da adubação a lanço com SFT apenas quando não houve adubação fosfatada no sulco de semeadura, e o efeito da adubação fosfatada no sulco de semeadura foi encontrado principalmente quando não há aplicação de P em cobertura. Para as parcelas que receberam aplicações de SFT a lanço, não houve diferenças entre as doses 0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na semeadura da soja (Figura 4).

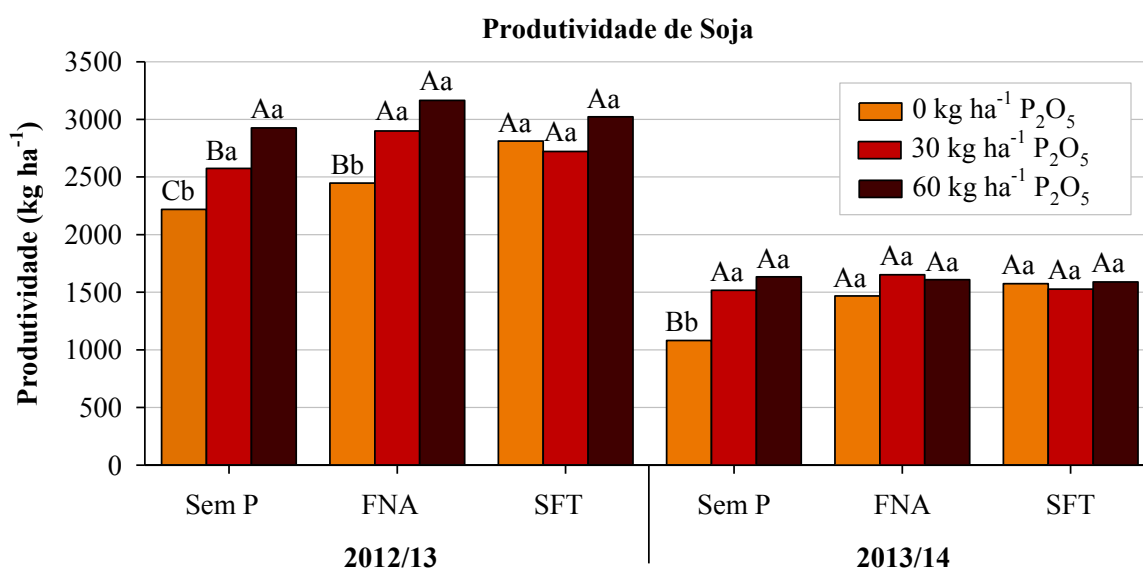


Figura 4 – Médias de produtividade de grãos de soja na interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P) e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg P₂O₅ ha⁻¹), nas safras 2012/13 e 2013/14. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada ano safra, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas comparam doses de P na semeadura e letras minúsculas comparam as fontes de P em cobertura.

Devido às limitações pelos fatores climáticos na safra 2013/14, houve menor desenvolvimento das plantas de soja e consequentemente as respostas aos tratamentos foram menos expressivas para a análise da interação do fator P cobertura e P

semeadura. Enquanto que na safra 2012/13 foi verificado uma produtividade de soja crescente de acordo com o aumento da dose de P_2O_5 no sulco de semeadura, na safra 2013/14, houve diferença entre a dose 0 e 30, e a dose 30 não diferiu da dose 60 kg ha⁻¹, quando não houve aplicação de P a lanço. Nas parcelas que não receberam P no sulco de semeadura, as fontes SFT e FNA proporcionaram a mesma produtividade, diferindo apenas da ausência de P a lanço, enquanto que no ano anterior o SFT favoreceu uma maior produtividade da soja do que o FNA, quando não foi aplicado P na semeadura (Figura 4).

Semelhante ao ano safra 2012/13, no ano safra 2013/14 também não foram encontradas respostas na produtividade da soja às doses da adubação no sulco de semeadura quando o solo recebeu SFT aplicado a lanço. A ausência de resposta de produtividade da soja à adubação fosfatada no sulco de semeadura quando houve aplicações de SFT pode ser atribuída ao teor de P no solo (33 mg dm⁻³ na camada de 0-20 cm), considerado médio para a produtividade da soja de acordo com Van Raij et al. (2001), o que reduz a probabilidade de resposta à adubação em uma cultura já pouco responsiva (PAVINATO; CERETTA, 2004; SOUSA et al., 2010).

A fosfatagem, ou aplicação de fertilizantes fosfatados a lanço, possibilita elevada adsorção de P devido à alta superfície de contato formada com o solo. Aliada ao sistema de semeadura direta, a fosfatagem se torna mais eficiente, pois as reações de adsorção são minimizadas pela presença de palhada e matéria orgânica (MALAVOLTA, 1981).

Diversos autores concordam que a aplicação superficial de P ao invés de adubação no sulco de semeadura pode aumentar o risco de perda de produtividade à medida que os teores de P disponível no solo sejam menores e ocorram déficit hídricos durante o desenvolvimento das culturas, uma vez que o desenvolvimento de raízes na camada superficial que recebeu a adubação fosfatada fica exposta às condições de menor umidade no solo (ANGHINONI, 2007; RHEINHEIMER DOS SANTOS et al., 2002; TROEH; THOMPSON, 2005). Porém, a produtividade da soja não foi limitada pela ausência de adubação fosfatada na semeadura da soja, nem mesmo com o grande déficit hídrico durante toda a safra 2013/14.

Essa falta de resposta de produtividade da soja à adubação no sulco de semeadura nas parcelas que receberam SFT a lanço não ocorreu em trabalho anterior sob a mesma área experimental. Janegitz (2012) verificou que a maior produtividade de soja nas parcelas que receberam SFT a lanço ocorreu com a dose de 60 kg ha⁻¹ na

semeadura da soja. A adição de P em solo com quantidade suficiente de P disponível para as plantas, como no caso das parcelas que receberam as aplicações de SFT a lanço e não houve resposta de aumento de produtividade da soja à adição de P na linha de semeadura, caracteriza o uso ineficiente de fertilizantes (SYERS et al., 2008), mas que só veio a ocorrer após 12 anos de cultivo nessa área experimental, o que revela uma informação interessante para a redução do consumo de fertilizantes fosfatados.

A indiferença na produtividade, quanto às doses de P quando houve adubação com SFT, obtida nas safras 2012/13 e 2013/14, possivelmente só ocorreu devido à melhor redistribuição do P residual das adubações com SFT a lanço, no perfil do solo. Essa redistribuição do P aplicado é bastante lenta, mas pode ocorrer sob semeadura direta até mesmo usando fontes pouco solúveis como o FNA, mas sendo limitada à uma pequena profundidade no perfil do solo (NUNES et al., 2011). No presente estudo, houve efeito da aplicação de fosfatos a lanço até na camada de 10-20 cm para diversas frações de P no solo, sendo esse um indicativo da distribuição do P dos fertilizantes aplicados na superfície do solo.

Com a aplicação de P no sulco de semeadura não houve diferenças entre a produtividade da soja quando foi aplicado FNA ou SFT em cobertura. Além dos teores de P extraído na análise de rotina serem maiores com FNA na primeira camada e semelhantes entre as duas fontes de P na segunda e terceira camada do solo, sob a dose 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, a eficiência do FNA é maior quando a espécie cultivada possui alta absorção de Ca, como no caso das leguminosas (DEAN; FRIED, 1953), pois a solubilidade dos fosfatos de Ca aumenta com a redução da concentração de Ca na solução do solo (CHIEN; MENON, 1995), e também porque a simbiose com rizóbios resulta em acidificação da rizosfera, possibilitando o consumo de P ligado ao Ca (QIN et al., 2011). Além disso, o tempo decorrido entre a primeira aplicação de FNA e essa avaliação de produtividade da soja é grande, o que é necessário para alcançar uma maior eficiência desse fertilizante (SOUSA et al., 2006).

Apesar do aumento na eficiência de aproveitamento do FNA, resultando em produtividade da soja semelhante ao proporcionado pelo SFT, esse resultado não é suficiente para afirmar que o FNA é uma boa fonte de P, pois assim como o observado por Rosolem e Almeida (2014), a baixa resposta ao FNA nos primeiros anos após a aplicação resulta em perdas de produtividade até que o FNA alcance uma adequada eficiência na disponibilização de P para as plantas, enquanto que fontes solúveis como o

SFT garantem maior produtividade desde os primeiros anos de aplicação, mesmo em aplicação superficial.

Como não houve interação do cultivo de braquiária e as aplicações de fosfatos a lanço ou das doses de P aplicadas no sulco de semeadura para a produtividade de grãos de soja, pode-se concluir que o uso dessa gramínea na entressafra não resulta em aumento da eficiência de aproveitamento dos fertilizantes para determinação da produtividade da soja.

6.4.3 Diagnose foliar e exportação de P

Houve interação dos tratamentos com adubação a lanço e no sulco de semeadura para o teor de P em trifólios coletados em estágio fenológico R2 (Tabela 39). Semelhante ao observado para a produtividade da soja, a análise da interação da adubação a lanço com as doses de adubação na semeadura revela que o teor de P nos trifólios aumenta de acordo com a dose aplicada na semeadura quando não há adubação a lanço, ou seja, a resposta da adubação ocorre quando há menores teores de P no solo. Quando o solo foi adubado com SFT a lanço não há resposta a adubação de semeadura no teor de P da soja. Da mesma forma, quando o solo foi adubado constantemente com a maior dose de P na semeadura, não há efeito das adubações a lanço.

Tabela 39 - Teores médios de P em trifólios de soja, em função da interação do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.

P cobertura	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
	----- P (g kg ⁻¹) -----			
Sem P	5,0 Cc	5,5 Bb	6,1 Aa	5,5
FNA	5,6 Bb	6,2 Aa	6,2 Aa	6,0
SFT	6,1 Ba	6,5 Aa	6,7 Aa	6,4
Média	5,5	6,1	6,3	6,0

*Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Também houve interação dos tratamentos braquiária e adubação no sulco de semeadura (Tabela 40). Na interação do cultivo de braquiária e as doses de P aplicadas na semeadura da soja, o teor de P em trifólio de soja foi menor após braquiária quando foi aplicada a dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Na presença de braquiária, a dose 30 kg

ha⁻¹ de P₂O₅ proporcionou o mesmo teor de P em trifólio do que a dose de 60 kg ha⁻¹. Após pousio, a dose que proporcionou maior teor de P em trifólio foi de 60 kg ha⁻¹.

Tabela 40 - Teores médios de P em trifólios de soja, em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.

Braquiária	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
	----- P (g kg ⁻¹) -----			
Com	5,5 Ab	6,2 Aa	6,1 Ba	5,9
Sem	5,6 Ac	6,0 Ab	6,6 Aa	6,0
Média	5,5	6,1	6,3	6,0

*Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Apesar da maior disponibilidade de P no solo cultivado com a braquiária, com a análise da diagnose foliar foi possível observar que a nutrição de P da soja foi afetada negativamente após o cultivo de braquiária, sendo o teor médio de P em trifólio após pousio e com a dose 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ maior do que após braquiária (Tabela 40), mas longe de alcançar níveis que caracterizam deficiência nutricional, encontrados abaixo de 2,6 g kg⁻¹, segundo Malavolta et al. (1997). Esse resultado é o oposto do obtido por Merlin (2008), que verificou melhor nutrição das plantas de soja com relação ao P após o cultivo da braquiária.

Houve efeito das doses de P no sulco de semeadura sobre o teor de N e Ca nos trifólios de soja. A média do teor de N para as parcelas que receberam 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi maior do que na dose 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e o teor de Ca nas folhas não foi diferentes entre as doses 30 e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Tabela 41).

Tabela 41 - Teores médios de N e Ca em trifólios de soja, em função das doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.

Nutriente	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)		
	0	30	60
N (g kg⁻¹)	44,3 B	44,7 B	48,6 A
Ca (g kg⁻¹)	10,0 B	11,9 A	11,9 A

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os teores de N, K, Ca e Mn foram menores nas parcelas que receberam rotação com braquiária do que nas parcelas mantidas em pousio (Tabela 42). O teor médio de N foliar nas parcelas com braquiária está abaixo da faixa de suficiência de N para a soja, 45 até 55 g kg⁻¹ (MALAVOLTA et al., 1997), pois houve algumas parcelas que apresentaram deficiência nutricional de acordo com essa faixa de exigência, principalmente nos tratamentos que não recebem adubação fosfatada e com a dose 30 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na semeadura da soja.

Tabela 42 - Teores médios de N, K, Ca e Mn em trifólios de soja, em função da presença e ausência de braquiária na entressafra de soja, referente às amostras coletadas na safra 2012/13.

Nutriente	Manejo na entressafra	
	Braquiária	Pousio
N (g kg⁻¹)	43,8 B	47,9 A
K (g kg⁻¹)	20,4 B	23,1 A
Ca (g kg⁻¹)	10,7 B	11,8 A
Mn (g kg⁻¹)	53,4 B	68,0 A

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Nesta mesma área experimental, não há relatos de deficiência de nitrogênio ou de nenhum outro nutriente em cultivos anteriores de soja, mesmo após o cultivo de braquiária. Foram observadas diferenças para o teor de outros nutrientes, mas nenhum destes nutrientes apresentaram casos de deficiência nutricional na soja, além do N.

Já o teor de Mg foi diferente apenas quanto à adubação de P a lanço, sendo maior quando houve a aplicação de SFT (Tabela 43).

Tabela 43 - Teores médios de Mg e Zn em trifólios de soja, em função de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT, e uma testemunha sem P), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.

Nutriente	Fontes de P em cobertura		
	Sem P	FNA	SFT
Mg (g kg⁻¹)	4,1 B	4,4 AB	4,7 A
Zn (mg kg⁻¹)	43,1 A	39,5 B	42,0 A

*Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Entre os micronutrientes, apenas o teor de Mn e Zn sofreram alterações em função dos fatores analisados. O teor de Cu e Fe tiveram média de 9,1 e

174,9 mg kg⁻¹. O teor de Zn foi menor no tratamento com aplicação de FNA (Tabela 43), e sofreu interação dos fatores braquiária e doses de P na semeadura da soja, sendo menor apenas após o cultivo de braquiária e na ausência de P na semeadura (Tabela 44). O teor de Mn foi menor após o cultivo de braquiária (Tabela 42). Tanto o Zn quanto o Mn também apresentaram menor teor no solo após o cultivo de braquiária, mas apenas na última camada avaliada, no entanto essa menor concentração na camada de 20-40 cm refletiu em menor teor desses nutrientes na análise foliar. Tanto a concentração de Mn e Zn no solo quanto na planta estão dentro da faixa adequada para as plantas de soja (MALAVOLTA et al., 1997), e portanto, não se pode atribuir a redução da produtividade apenas à menor concentração desses nutrientes no solo e na planta.

Tabela 44 - Teores médios de Zn em trifólios de soja, em função da interação da presença e ausência de braquiária, e doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), referente às amostras coletadas na safra 2012/13.

Braquiária	Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)			Média
	0	30	60	
	----- Zn (mg kg ⁻¹) -----			
Com	35,9 Ab	46,5 Aa	44,0 Aa	42,1
Sem	41,4 Aa	39,6 Aa	41,7 Aa	40,9
Média	38,7	43,0	42,9	41,6

*Médias seguidas pela mesma letra maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A análise dos resultados de fertilidade do solo revela uma maior concentração de vários nutrientes (P, Mg, K) e de matéria orgânica nas primeiras camadas do solo após o cultivo de braquiária, e no entanto, a nutrição da soja foi afetada negativamente após o cultivo dessa gramínea, o que leva à hipótese de que há algum fator capaz de inibir a adequada nutrição das plantas de soja após o cultivo da braquiária.

Quanto ao teor de P em grãos, foi observado que o teor de P e a exportação de P em grãos não sofreram reduções em relação ao cultivo de braquiária, mas houve diferenças para os fatores P cobertura e P semeadura. O teor de P em grãos e a exportação de P em grãos foram iguais quando foi aplicado SFT ou FNA a lanço, sendo menores apenas quando não houve aplicação a lanço (Tabela 45).

Tabela 45 – Teor de P para cada kg de grãos e exportação de P para cada 1000 kg de grãos de soja, em função do efeito residual de fontes de P aplicadas em cobertura (FNA, SFT e uma testemunha sem P), após a colheita na safra 2012/13.

Fontes de P em cobertura	Teor de P em grãos (g kg ⁻¹)	Exportação de P em grãos (kg Mg ⁻¹)
Sem P	4,1 b	10,8 b
FNA	4,6 a	13,5 a
SFT	5,0 a	14,2 a
Média	4,5	12,7

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Na aplicação de P no sulco de semeadura, o teor de P nos grãos apresentou diferenças apenas quando não houve aplicação de P, e a exportação de P nos grãos foi maior apenas na dose 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, sendo que a ausência de aplicação de P não teve diferença quando comparada com a dose 30 kg ha⁻¹ (Tabela 46).

Tabela 46 – Teor de P para cada kg de grãos e exportação de P para cada 1000 kg de grãos de soja, em função do efeito de doses de P na semeadura da soja (0, 30, e 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅), após a colheita na safra 2012/13.

Doses de P na semeadura (kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅)	Teor de P em grãos (g kg ⁻¹)	Exportação de P em grãos (kg Mg ⁻¹)
0	4,0 B	10,4 B
30	4,4 A	12,5 B
60	5,2 A	15,7 A
Média	4,5	12,7

*Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

7 CONCLUSÕES

A rotação com *B. ruzizensis* na entressafra promove maior disponibilidade de P inorgânico para a cultura seguinte.

O cultivo de braquiária aumenta a disponibilidade das formas de P independente da forma de adubação fosfatada, a lanço ou no sulco de semeadura, e reduz a concentração das formas de P pouco lábeis do solo.

Apesar de todos os benefícios gerados na fertilidade do solo com o cultivo da braquiária na entressafra, não é possível obter vantagens na produtividade de soja.

Em função da menor produtividade da soja em rotação com a braquiária *ruzizensis*, a eficiência no aproveitamento dos fertilizantes fosfatados não pode ser elevada com o cultivo da braquiária.

Há a ação de algum fator capaz de limitar a nutrição das plantas de soja em rotação com braquiária *ruzizensis* e conseqüentemente reduzir a produtividade de grãos. Assim, é necessário realizar novos estudos para determinar a causa de queda de produtividade da soja, e possíveis soluções para contornar essa situação.

8 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 985-1002, 2003.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 1, p. 873-928.

BARLEY, K. P. The configuration of the root system in relation to nutrient uptake. **Advances in Agronomy**, New York, v. 22, p. 159-201, 1970.

BARROTI, G.; NAHAS, E. População microbiana total e solubilizadora de fosfato em solo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 2043-2050. 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e sub tropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

BLAKE, L. et al. Changes in soil phosphorus fractions following positive and negative phosphorus balances for long periods. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 254, p. 245–261, 2003.

BODDEY, R. et al. Nutrient cycling and environmental impact of Brachiaria pastures. In: MILES, J. et al. (Eds.), **Brachiaria: Biology, Agronomy and Improvement**. Cali/Brasília: CIAT/EMBRAPA, 2006. p. 72-86.

BOWMAN, R. A.; COLE, C. V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 125, p. 95-101, 1978.

BUCHER, M. Functional biology of plant phosphate uptake at root and mycorrhiza interfaces. **New Phytologist**, Oxford, v. 173, p. 11-26, 2007.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus and potassium balance in a corn-soybean rotation under no-till and chiseling. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 96, p. 123-131, 2013.

CEPAGRI – Centro de Pesquisa Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura.

Clima dos municípios paulistas: Botucatu. Disponível em:

<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html>. Acesso em 20 maio 2014.

CHEN, C.R. et al. Effects of afforestation on phosphorus dynamics and biological properties in a New Zealand grassland soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 220, p. 151-163, 2000.

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

CHIEN S. H. et al. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, p. 229-255, 2011.

CHOUDHARY, M. et al. Substitution of rock phosphate and legumes for commercial fertilizers. In: HUANG, P. M. et al. (Eds.). **Environmental impact of soil component interactions**: Volume 2: metals, other inorganics, and microbial activities. Boca Raton: CRC Press Inc., 1995, p. 99-108.

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

CORRÊA, J. C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C. A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1231-1237, 2004.

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

- DAKORA, F. D.; PHILLIPS, D. A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient Environments. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 245, p. 35–47, 2002.
- DEAN, L. A.; FRIED, M. Soil-plant relationships in the phosphorus nutrition of plants. In: PIERRE, W. H.; NORMAN, A. G. (Eds.). **Soil fertilizer phosphorus in crop nutrition**. New York: Academic Press, 1953. Cap.2, p. 43-58.
- DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 6, p. 82-85, 1977.
- DOORENBUS, I.; KASSAM, A.H. **Yield Response to Water**. FAO, Rome, 1979. 193p.
- DUFF, S. M. G.; SARATH, G.; PLAXTON, W. C. The role of acid phosphatases in plant phosphorus metabolism. **Physiologia Plantarum**, Malden, v. 90, p. 791–800, 1994.
- DUIKER, S. W.; BEEGLE, D. B. Soil fertility distributions in long-term no-till, chisel/disk and moldboard plow/disk systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 30-41, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Embrapa). **Sistema brasileiro de classificação de solos**: 4.ed. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.
- FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils: An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 45, n. 2, p. 91-100, 1996.
- FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E.; BURMOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stages of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merrill. **Crop Science**, Madison, v. 11, n. 6, p. 929-931, 1971.
- FRANCHINI, J. C. et al. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 231, p. 55- 63, 2001.
- FRANCHINI, J. C. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2267- 2276, 1999.
- GAHOONIA, T. S. et al. Root-released organic acids and phosphorus uptake of two barley cultivars in laboratory and field experiments. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 12, p. 281-289, 2000.

GALVANI, R.; HOTTA, L. F. K.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus sources and fractions in an oxisol under no-tilled soybean. **Scientia agrícola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 415-421, 2008.

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

GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GOEDERT, W. J.; OLIVEIRA, S. A. Fertilidade do solo e sustentabilidade da atividade agrícola. In: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v.1. p. 991-1017.

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. Uso de Fertilizantes Fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FETILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília, DF. **Anais...** Brasília: EMBRAPA-DID, 1984, p. 255-290.

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

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

GUPPY, C.N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 43, p. 189-202, 2005.

HABIB, L. et al. Rape response to a Syrian phosphate rock and its mixture with triple superphosphate on a limed alkaline soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 30, p. 449-456, 1999.

HAFNER, H, et al. Effect of crop residues on root-growth and phosphorus acquisition of pearl millet in an acid sandy soil in Niger. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 150, p. 117-127, 1993.

HAMMOND, L. L.; CHIEN, S. H.; EASTERWOOD, G. W. Agronomic effectiveness of Bayovar phosphate rock in soil with induced phosphorus retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1601-1606, 1986.

HARE, M. D. et al. Brachiaria species in north-east Thailand: dry matter yields and seed production. **Tropical Grasslands**, St. Lucia, v. 39, p. 99–106, 2005.

HARGROVE, W. L. et al. Influence of tillage practices on the fertility status of an acid soil double-cropped to wheat and soybeans. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 684–687, 1982.

HÄUSSLER, K. et al. Shoot and root growth of two tropical grasses, *Brachiaria ruziziensis* and *B. dictyoneura*, as influenced by aluminium toxicity and phosphorus deficiency in a sandy loam Oxisol of the eastern plains of Colombia. **Tropical Grasslands**, St. Lucia, v. 40, p. 213–221, 2006.

HAYNES, R.J. Relative ability of a range of crop species to use phosphate rock and monocalcium phosphate as P sources when grown in soil. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 60, p. 205–211, 1992.

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

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 237, n. 2, p. 173–195, 2001.

HU, H. Q.; TANG, C. X.; RENGEL, Z. Role of phenolics and organic acids in phosphorus mobilization in calcareous and acidic soils. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 28, p. 1427–1439, 2005.

JANEGITZ, M. **Ciclagem e disponibilidade de fósforo para a soja em rotação com braquiária como espécie de cobertura**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere: a critical review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, p. 25–44, 1998.

LAEGREID, M.; BOCKMAN, O. C.; KAARSTAD, O. **Agriculture fertilizers and environment**. Wallingford: CAB, 1999. 294p.

LIENHARD, P. et al. No-till and cover crops shift soil microbial abundance and diversity in Laos tropical grasslands. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 33, p. 375–384, 2013.

LILIENFEIN, J., et al. Chemical fractionation of phosphorus, sulphur, and molybdenum in brazilian savannah Oxisols under different land use. **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, p. 31–46, 2000.

LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979, 449p.

LOPES, A. S.; SILVA, C. A. P.; BASTOS, A. R. R. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, Potafós, 2004. p.13-34

LOUW-GAUME, A. E. et al. A comparative study on plant growth and root plasticity responses of two Brachiaria forage grasses grown in nutrient solution at low and high phosphorus supply. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 328, p. 155–164, 2010.

MACEDO, M. C. M. Adubação fosfatada em pastagens cultivadas com ênfase na região do Cerrado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, Potafós, 2004. p. 359-396.

MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 61, p. 119–130, 2001.

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

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

MAGALHÃES, A. F et al. Influência do nitrogênio e do fósforo na produção do capim-braquiária. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 36, p. 1240-1246, 2007.

MERLIN, A. **Aumento da disponibilidade de fósforo em solo cultivado com Brachiaria em rotação com soja**. 2012. 63 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

MERLIN, A. et al. Ruzigrass affecting soil-phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, p. 1583-1588, 2013.

MIYASAKA, S. C.; HABTE, M. Plant mechanisms and mycorrhizal symbioses to increase phosphorus uptake efficiency. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 32, p. 1101-1147, 2001.

MOKWUNYE, A. U.; CHIEN, S. H. Reactions of partially acidulated phosphate rock with soils from the tropics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 477–482, 1980.

MOREL, Ch.; FARDEAU, J. C. Uptake of phosphate from soils and fertilizers as affected by soil P availability and solubility of phosphorus fertilizers. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 121, p. 217-224, 1990.

MOUCAWI, J.; FUSTEC, E.; JAMBU, P. Biooxidation of added and natural hydrocarbons in soil: effect of iron. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 13, p. 335-342, 1981.

MURPHY, L.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 13-36, 1962.

NATH, R. L. Influence of structure of substrate on the hydrolysis of alkyl and aryl phosphates by phosphohydrolases: Mechanism of acid and alkaline phosphatases. **New York Academy of Sciences. Annals**, Hoboken, v. 166, p. 653-668, 1969.

NEPOMUCENO, M. P. et al. Períodos de dessecação de *Urochloa ruziziensis* e seu reflexo na produtividade da soja RR. **Planta Daninha**, Jaboticabal, v. 30, p. 557-565, 2012.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, p. 121–130, 1999.

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

NUNES, R. S. et al. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 877-888, 2011.

NZIGUHEBA, G. et al. Organic residues affect phosphorus availability and maize yields in a Nitosol of western Kenya. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 32, n. 4, p. 328-339, 2000.

OHWAKI, Y.; HIRATA, H. Differences in carboxylic acid exudation among P-starved leguminous crops in relation to carboxylic acid contents in plant tissues and phospholipid level in roots. **Soil Science and Plant Nutrition**, Singapore, v. 38, p. 235–243, 1992.

OLIBONE, D.; ROSOLEM, C. A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 465-471, 2010.

OLIVEIRA, A. J. **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília: Embrapa, 1982. 326p.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L.E. Phosphorus. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. (Eds.). **Methods of Soil Analysis**. 2. ed. Madison: ASA and SSSA, v. 2, p. 403-430, 1982.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, New York, v. 30, p. 1-50, 1978.

PAVINATO, P. S.; CERETTA, C. A. Fósforo e potássio na sucessão trigo/milho: épocas e formas de aplicação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1779-1784, 2004.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Organic compounds from plant extracts and their effect on soil phosphorus availability. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 10, p. 1379-1388, 2008.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1031-1040, 2009a.

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

PEREIRA, M. G. et al. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 508-514, maio 2010.

PROCHNOW, L. I. et al. Effectiveness of phosphate fertilizers of different water solubilities in relation to soil phosphorus adsorption. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 4, p. 333-340, 2006.

QIN, L. et al. Rhizobia enhance acquisition of phosphorus from different sources by soybean plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 349, p. 25–36, 2011.

RAGHOTHAMA, K. G. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 665–93, 1999.

RAVEN, J. A. et al. H⁺ extrusion and organic-acid synthesis in N₂-fixing symbioses involving vascular plants. **New Phytologist**, Oxford, v. 114, p. 369–389, 1990.

REDEL, Y. D. et al. Phosphorus bioavailability affected by tillage and crop rotation on a Chilean volcanic derived Ultisol. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, p. 388-396, 2007.

RHEINHEIMER DOS SANTOS, D.; ANGHINONI, I.; FLORES, A. F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 33, p. 1853–1871, 2002.

RHEINHEIMER DOS SANTOS, D. et al. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 1053-1059, 2003.

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

RICHTER, D. D.; BABBAR, L. I. Soil diversity in the tropics. **Advances in Ecological Research**, London, v. 21, p. 316-389, 1991.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA D. S. Are reactive rock phosphate and superphosphate mixtures suitable for no-till soybean? **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, p. 1455-1460, 2014.

SANCHEZ, C. A. Phosphorus. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J. (Eds.). **Handbook of plant nutrition**. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 51-90.

SHARPLEY, A. N. Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental Impacts. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 5, p. 261-279, 1995.

SILVA, M. L. N. et al. Rotação adubo verde - milho e adsorção de fósforo em latossolo vermelho-escuro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, p. 649-654, 1997.

SIMPSON, M. et al. Effects of long-term grassland management on the chemical nature and bioavailability of soil phosphorus. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 48, n. 5, p. 607-611, 2012.

SIQUEIRA, J. O.; ANDRADE, A. T.; FAQUIM, V. O papel dos microrganismos na disponibilização e aquisição de fósforo pelas plantas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Eds.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p.117-149.

SOUSA, D. M. G. et al. Fósforo. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Eds.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, v. 2, 2010, p.67-132.

SOUZA SOBRINHO, F. et al. Produtividade e qualidade da forragem de Brachiaria na Região Norte Fluminense. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 2, p. 7-12, 2009.

STEWART, J. W. B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 4, p. 41-60, 1987.

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use**. Rome: FAO, 2008. 108p.

TATE, K. R. The biological transformation of P in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, p. 245-256, 1984.

TIECHER, T. et al. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 271-281, 2012.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Soils and soil fertility**. New York: Oxford University Press, 1.ed. 1993. 462p.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafós, 1991. 343p.

VAN RAIJ, B.V. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

VANDAMME, E. Root hairs explain P uptake efficiency of soybean genotypes grown in a P-deficient Ferralsol. **Plant and Soil**, Dordrecht, p. 1-14, 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11104-012-1571-2>>. Acesso em: 08 abr. 2013.

WANG, X. R.; YAN, X. L.; LIAO, H. Genetic improvement for phosphorus efficiency in soybean: a radical approach. **Annals of Botany**, Oxford, v. 106, p. 215-222, 2010.

WENZL, P. et al. The high level of aluminum resistance in signalgrass is not associated with known mechanisms of external aluminum detoxification in root apices. **Plant Physiology**, Rockville, v. 125, p. 1473–1484, 2001.

ZAPATA, F.; ROY, R. N. **Use of phosphate rocks for sustainable agriculture**. Rome: FAO, 2004. 147p.