

SILVIA CAPUANI

**FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS OXÍDICOS EM FUNÇÃO DE CORRETIVOS
DA ACIDEZ DO SOLO, FONTES DE FÓSFORO E PLANTAS DE COBERTURA**

Botucatu

2017

SILVIA CAPUANI

**FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS OXÍDICOS EM FUNÇÃO DE CORRETIVOS
DA ACIDEZ DO SOLO, FONTES DE FÓSFORO E PLANTAS DE COBERTURA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes

Botucatu

2017

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

C255f	Capuani, Silvia, 1986- Formas de fósforo em solos oxidicos em função de corretivos da acidez do solo, fontes de fósforo e plantas de cobertura / Silvia Capuani. - Botucatu: [s.n.], 2017 125 p.: grafs. color., ils., tabs. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2017 Orientador: Dirceu Maximino Fernandes Inclui bibliografia 1. Solos - Teor de fósforo. 2. Solos ácidos. 3. Cultivos de cobertura. 4. Fertilizantes fosfatados. 5. Plantas - Efeito do fósforo. I. Fernandes, Dirceu Maximino. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.
-------	--

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: FORMAS DE FÓSFORO EM SOLOS OXÍDICOS EM FUNÇÃO DE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, FONTES DE FÓSFORO E PLANTAS DE COBERTURA

AUTORA: SILVIA CAPUANI

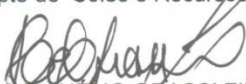
ORIENTADOR: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



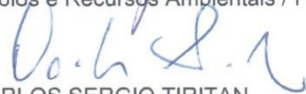
Prof. Dr. HELIO GRASSI FILHO

Depto de Solos e Recursos Ambientais / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. ROBERTO LYRA VILLAS BOAS

Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. CARLOS SERGIO TIRITAN

Departamento de Solos / UNIVERSIDADE DO OESTE PAULISTA



Profa. Dra. ROSEMARY MARQUES DE ALMEIDA BERTANI

APTA - Regional Bauru / Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios

Botucatu, 04 de julho de 2017

Aos meus pais Darci e Zaira, minha irmã Denise, ao Nêno e Nêna, pelas orações e por toda compreensão e amor sempre. Amo vocês.

Oferço

*Ao meu noivo, João Paulo, pelo amor, amizade e
companheirismo, incondicionais.*

Te amo

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus pela oportunidade de estar aqui nesta Terra e poder encontrar pessoas tão especiais, que foram e sempre serão importantes na minha caminhada. Assim, quero expressar minha gratidão:

À UNESP - Câmpus de Botucatu, pela acolhida e suporte nesta etapa tão importante da minha vida profissional.

À Capes pelo apoio financeiro durante o período do doutorado.

Ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, de forma especial ao Dalton Belchior Abdala e Flávio Vicentin, por todo suporte durante as semanas de análises na beamline SXS.

Ao professor Dean Hesterberg, que me recebeu muito bem em Raleigh – Carolina do Norte, desprendendo tempo com muita paciência nos ensinamentos sobre XANES e LCF.

Ao Prof. Dr. Tanaka Haruo, pela acolhida e paciência em minha estadia na Tokyo University of Agriculture and Technology.

Ao meu orientador Professor Dirceu, que tantas vezes me disse “Calma Silvia!”, eu sei que o senhor tinha razão, e enfim, acredito que aprendi a me controlar um pouquinho! Professor, sou imensamente grata pela parceria, por ter acreditado em mim.

Aos funcionários do departamento de Solos e Recursos Naturais, José Carlos “Zé”, Marta, Sônia, Larissa, Dorival, Selma, Seu de Pieri, Sylvinha, Felipe, Seu Jair, Noel, Adilson, Guto, Roberto, por todo auxílio que recebi e pela amizade.

À Adriana Ramos, minha “mãezinha”, que sempre esteve perto e pronta pra me ouvir e consolar quando era preciso, com um abraço tão cheiroso e gostoso!

Aos funcionários do departamento de Agricultura e Melhoramento Vegetal, pela amizade e suporte, assim como as funcionárias da Pós-Graduação, sempre solícitas e amigas.

De maneira muito especial e cheia de carinho, aos meus amigos e amigas conquistados aqui, durante todos os anos em que estudei nesta escola: Tiara e Cláudio, Mariângela e Gustavo, Livia e Jayme, Rubiana, Camila, Gleize, Caio, Tailene e Flávio, Kassiano e Josi, Letícia e Humberto, Camila Jacon, Grasiela e Felipe, Giulia, Natália, e tantas outras pessoas queridas que passaram por minha vida neste período, gratidão!

Aos meus estagiários Luiz Miguel, Nicole e Isabela, pela companhia, parceria, e claro da amizade em tantas análises e coletas.

RESUMO

O fósforo (P) é um dos principais fatores limitantes ao crescimento e produção de culturas agrícolas em solos de regiões tropicais. Em decorrência da baixa concentração de hidroxilas em solos ácidos a retenção do fósforo da solução é favorecida. O uso de fontes de P combinado ao cultivo de espécies de coberturas do solo pode auxiliar na disponibilidade de fósforo no solo para as plantas. Objetivou-se estudar as combinações de fontes de P e coberturas do solo na disponibilização de P às culturas da soja e do milho, além da distribuição das frações inorgânicas de P no LVdf e LVd, quando submetido à diferentes corretivos da acidez. Para tal, foram realizadas duas fases, sob proteção plástica, em dois Latossolos, o LVdf e o LVd. Na primeira foram realizados três experimentos, em vasos de 20 litros, variando forma de calagem/silicatagem (100% calcário; 100% escória de aciaria; 50%+50%), as fontes de P, 300 mg dm⁻³, (superfostato triplo (SFT), fosfato reativo (FR) e fosfato precipitado (FP)); plantas de cobertura (braquiária e sorgo) mais a testemunha sem planta; cultivados com soja e milho como plantas teste. Após cada cultivo eram realizadas as análises química do solo e fracionamento de P inorgânico. A segunda fase procedeu-se apenas o tratamento 50% calcário+50% escória de aciaria. A adubação foi realizada via solução nutritiva, exceto o P, sendo mantidos os tratamentos com as fontes de P e as plantas de cobertura e plantas testes. Nas amostras de solo do segundo experimento foi realizada análise espectroscopia de raio-X do P na borda K de absorção, através da linha de SXS do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. No primeiro experimento observou-se incremento nos teores dos cátions básicos, bem com SB, após os tratamentos com as fontes de P, em ambos os solos, de forma mais pronunciada ao LVd, no qual notou-se o aumento da fração P-Fe. O FR proporcionou incremento nos teores de micronutrientes nos dois Latossolos. Além disso, as fontes alternativas, fosfato precipitado 1 e 2 (FP1 e FP2), demonstraram capacidade de fornecimento de P pelos FP1 e 2, para solos estudados. No segundo experimento os resultados comprovaram o fornecimento de P pelos fosfatos precipitados, mesmo após três ciclos de cultivo. A presença das coberturas do solo não conferiu acúmulo de P nas culturas da soja e do milho. Os maiores compartimentos do P nos solos continuaram a ser P-Al e P-Fe. As análises de XANES apontaram para a predisposição de fósforo ligado ao Ferro, demonstrado através da correlação entre as amostras e o padrão de Ferridrita, para ambos os solos estudados, em todas as fontes de P utilizadas, independentemente da cobertura do solo.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo; disponibilidade de fósforo; XANES; escória de aciaria; fertilizantes fosfatados.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is one of the main limiting factors to growth and production of agricultural crops in tropical soils. Due to the low concentration of hydroxyls in oxisol, the phosphorus retention of the solution is favored. The use of P sources combined with the cultivation of soil cover crops may help in the availability of phosphorus in the soil to the plants. It was supported the study of combinations of P sources and cover crops in the availability of P in soybean and corn crops, as well as the distribution of inorganic fractions of P when submitted to different acidity correctives. For this, in two phases, under plastic protection, were carried out in two Oxisol. First phase: three combinations of limestone and slag (100% limestone, 100% slag, 50% + 50%), three P sources at 300 mg dm^{-3} (Triple superphosphate (TSP), reactive phosphate, and precipitated phosphate (PF)); Cover plants (*Urochloa decumbens* and *Sorghum bicolor*) plus the control without cover crop, cultivated with soybean and corn as test plants. After each cultivation, soil chemical analysis and inorganic P fractionation were performed. In the second phase, only 50% limestone+50% slag of steel treatment was processed. A fertilization was carried out through a nutrient solution, except P, being treated as sources of P and as cover plants and tested plants. In the soil samples from the second experiment, spectroscopic X-ray was performed on the Absorption Near Edge through the SXS beamline of the National Laboratory of Synchrotron Light. In the first experiment, it was observed an increase in the basic cations contents, as well as the sum of bases, after treatments with P sources in both soils, in a more pronounced way to the LVd, with an increase in the Fe-P fraction. FR provided the increase in micronutrient contents in both Oxisols. In addition, as alternative sources precipitated phosphate 1 and 2 (FP1 and FP2), demonstrated the capacity of supply of P by FP1 and 2, for studied soils. In the second experiment, the results confirmed the supply of P by the precipitated phosphates, even after three cycles of cultivation. The presence of soil cover did not confer P accumulation in soybean and corn crops. The largest compartments of P in the soils remained Al-P and Fe-P. XANES pointed to the predisposition of iron - bound phosphorus, demonstrated by the correlation between the samples and the Ferrihydrite pattern, for both studied soils, in all P sources, regardless of soil cover.

Keywords: Phosphorus fractionation; availability of phosphorus; XANES; slag; phosphorus fertilizers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Sequências de cultivos conforme estádios fenológicos das culturas..	47
Figura 2	Resultado da análise do solo nos tratamentos com o calcário e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP 1 e 2 - Fosfato precipitado).....	52
Figura 3	Resultado da análise do solo nos tratamentos com a escória de aciaria e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, da cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP 1 e 2- Fosfato precipitado).....	53
Figura 4	Resultados da análise do solo nos tratamentos com a composição calcário + escória de aciaria (C+E) e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP 1 e 2 - Fosfato precipitado).	55
Figura 5	Fracionamento químico do P inorgânico (mg dm^{-3}) no solo LVdf após o cultivo das coberturas (CS), soja e milho, de acordo com os corretivos calcário (A), escória de aciaria (B) e calcário+escória de aciaria (C).....	65
Figura 6	Fracionamento químico do P inorgânico (mg dm^{-3}) no solo LVd após o cultivo das coberturas (CS), soja e milho, de acordo com os corretivos calcário (A), escória de aciaria (B) e calcário+escória de aciaria (C).....	69
Figura 7	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente ao calcário no LVdf. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).....	73
Figura 8	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente à escória de aciaria no LVdf. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).....	74
Figura 9	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) os teores foliares das coberturas (CS), soja e milho no tratamento com calcário + escória (C+E) no LVdf. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).....	75
Figura 10	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente ao calcário no LVd. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).....	76
Figura 11	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente a escória de aciaria no LVd. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).....	77
Figura 12	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente ao calcário no LVd (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato	

	precipitado 1)	78
Figura 13	Resultado da análise do solo nos tratamentos com calcário + escória de aciaria e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf - A) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd - B) após as coberturas do solo, cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP1- Fosfato precipitado 1).....	89
Figura 14	Fracionamento inorgânico do P em um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf – A) e um Latossolo Vermelho distrófico (LVd – B) após os cultivos de plantas de cobertura, soja e milho sob diferentes fontes de P. FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 e FP2: fosfato precipitado 1 e 2.....	95
Figura 15	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) na análise foliar das coberturas, soja e milho frente ao calcário no LVdf, durante a segunda fase do experimento (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1)	99
Figura 16	Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) na análise foliar das coberturas, soja e milho frente ao calcário no LVd, durante a segunda fase do experimento (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1)	100
Figura 17	Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está associado ao Fe e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....	105
Figura 18	Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está associado ao Al e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....	106
Figura 19	Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está associado ao Ca e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....	107
Figura 20	Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está em formas orgânicas e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.....	108
Figura 21	Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P em um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF)	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento analisados de 0 a 20 cm de profundidade.....	45
Tabela 2	Caracterização química e física dos corretivos de acidez do solo.....	46
Tabela 3	Características químicas das fontes fosfatadas utilizadas no experimento.....	46
Tabela 4	Interações entre as fontes de P e as coberturas no solo LVdf.....	55
Tabela 5	Interações entre as fontes de P e as coberturas no solo LVd.....	56
Tabela 6	Efeito das coberturas do solo (CS): sorgo (S), braquiária (B) e ausência de planta (SP) nos teores dos nutrientes, matéria orgânica (g kg^{-1}) (MO), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB) e CTC ($\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$), nos tratamentos com calcário (calc) e escória (esc) no Latossolo Vermelho distroférico.....	57
Tabela 7	Efeito das coberturas do solo (CS): sorgo (S), braquiária (B) e ausência de planta (SP) nos teores dos nutrientes, matéria orgânica (g kg^{-1}) (MO), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB) e CTC ($\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$), nos tratamentos com calcário (calc) e escória (esc) no Latossolo Vermelho distrófico.....	65
Tabela 8	Médias dos teores de Pi (mg dm^{-3}) obtidos no fracionamento do P do solo LVdf, primeira fase, perante as coberturas utilizadas e o tratamento ausência de planta (S/Planta).....	68
Tabela 9	Médias dos teores de Pi (mg dm^{-3}) obtidos no fracionamento do P do solo LVd, primeira fase, perante as coberturas utilizadas e o tratamento sem planta (S/Planta).....	70
Tabela 10	Produção de massa de matéria seca (g vaso^{-1}) das coberturas (CS), soja e milho, cultivadas durante a primeira fase do experimento (2014/2015) no LVdf, em função das fontes de fósforo e presença (Sorgo e Braquiária) e ausência de planta de cobertura.....	85
Tabela 11	Produção de massa de matéria seca (g vaso^{-1}) das coberturas (CS), soja e milho, cultivadas durante a primeira fase do experimento (2014/2015) no LVd, em função das fontes de fósforo e presença (Sorgo e Braquiária) e ausência de planta de cobertura.....	86
Tabela 12	Resultado da análise de solo do Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), após as coberturas do solo (CS), soja e milho cultivados com sorgo, braquiária e sem cultivo (sem planta) na segunda fase do experimento.....	90
Tabela 13	Resultado da análise de solo do Latossolo Vermelho distrófico (LVd), após as coberturas do solo (CS), soja e milho cultivados sobre a palhada de sorgo, braquiária e sem cultivo (sem planta) na segunda fase do experimento.....	92
Tabela 14	Fracionamento inorgânico do P (mg kg^{-1}) no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, soja e milho cultivados sobre a palhada de sorgo, braquiária e ausência de planta (SP).....	97
Tabela 15	Produção de massa de matéria seca (g vaso^{-1}) das coberturas (CS), soja e milho, cultivadas durante a segunda fase do experimento	

	(2015/2016) no LVdf e LVd, em função das fontes de fósforo e presença (Sorgo e Braquiária) e ausência de planta de cobertura.....	104
Tabela 16	Distribuição relativa do fósforo estimada por meio do ajuste de combinação linear (LCF) em um Latossolo Vermelho distroférico após o cultivo de coberturas do solo (1) e de soja (2).....	110
Tabela 17	Distribuição relativa do fósforo estimada por meio do ajuste de combinação linear (LCF) em um Latossolo Vermelho distrófico após o cultivo de coberturas do solo (1) e de soja (2).....	112

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	O fósforo nos solos tropicais	22
2.2	Corretivos da acidez do solo	24
2.2.1	Calcário.....	25
2.2.2	Silicato.....	26
2.3	Fontes de fósforo	28
2.4	Formas de P em solos tropicais	31
2.5	Plantas de cobertura	38
3	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	Localização e caracterização dos experimentos	41
3.1.1	Fase I.....	41
3.1.1.1	Tratamentos.....	41
3.1.2	Fase II.....	43
3.2	Avaliações no solo	43
3.2.1	Análise química do solo.....	43
3.2.2	Fracionamento sequencial químico do fósforo inorgânico do solo.....	44
3.2.3	Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES).....	45
3.3	Análises nas plantas	45
3.3.1	Massa de matéria seca.....	46
3.3.2	Análise química.....	46
3.4	Delineamento experimental e análise estatística	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Fase 1	47
4.1.1	Latossolo Vermelho distroférico e Latossolo Vermelho distrófico.....	47
4.1.1.1	Análise química do solo.....	47
4.1.1.2	Fracionamento químico do P inorgânico.....	60
4.1.1.3	Análise química na planta.....	67
4.1.1.3.1	Teores de nutrientes na parte aérea da planta.....	67
4.1.1.3.2	Massa de Matéria Seca - MMS.....	80
4.1.2	Considerações Finais.....	83
4.2	FASE 2	83
4.2.1	Latossolo Vermelho distroférico e Latossolo Vermelho distrófico.....	83
4.2.1.1	Análises químicas do solo.....	84
4.2.1.2	Fracionamento químico do P inorgânico.....	90
4.2.1.3	Análise química na planta.....	93
4.2.1.3.1	Teores de nutrientes na parte aérea da planta.....	93
4.2.1.3.2	Massa de Matéria Seca - MMS.....	100
4.2.1.4	Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray Absorption Near Edge Structure).....	101
4.2.2	Considerações finais.....	109
5	CONCLUSÕES	111
	REFERÊNCIAS	112

1 INTRODUÇÃO

Em solos de regiões tropicais e subtropicais, devido ao seu alto grau de intemperismo, o fósforo é um dos principais fatores limitantes ao crescimento e produção de culturas agrícolas (RHEINHEIMER *et al.*, 1999). Em decorrência da baixa concentração de hidroxilas em solos ácidos a retenção do fósforo (P) da solução é favorecida, principalmente nas superfícies de oxihidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) ou de minerais de argila limitando a sua disponibilidade (RHEINHEIMER *et al.*, 2008). 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 (NOVAIS; SMYTH, 1999), além da correção da acidez natural destes solos.

Comumente a rocha calcária moída é utilizada para a correção da acidez do solo em superfície, constituindo os calcários, classificados como calcários calcíticos ou dolomíticos. Os calcários dissolvem-se e ao dissociar os carbonatos corrigem a acidez do solo. Além do calcário, materiais como os silicatos de cálcios, na forma de escória de aciaria, podem ser utilizados com vantagens, uma vez que apresentam ação neutralizante semelhante ao calcário, agindo com maior rapidez (6,78 vezes mais solúvel), inclusive em profundidade (ALCARDE, 1992).

O uso deste subproduto da indústria de ferro pode auxiliar na eficiência da adubação fosfatada, já que o há competição do silicato com o ânion fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do P no solo, saturando ou bloqueando estes. Também esboça uma relação com a persistência da palhada, influenciando a qualidade da cobertura vegetal, já que o Si é absorvido pelas plantas e depositado na parede celular, diminuindo a perda e/ou o acesso ao material celular durante a decomposição da palhada no solo (FERNANDEZ *et al.*, 2009). Inclusive a sugestão de fontes de Si em programas de adubação de P em Latossolos foi feita por Leite (1997), devido a interação Si-P em Latossolo Roxo com a cultura do sorgo (*Sorghum bicolor*). Por este motivo, considera-se que a aplicação de silicato via escória de aciaria pode resultar na disponibilidade de P no solo para as culturas.

Mais de 99% dos fertilizantes fosfatados são produzidos a partir de reservas de rochas fosfáticas e apenas uma quantidade muito pequena é fornecida na forma de escórias básicas (LOPES *et al.*, 2004). Como o desempenho dos fosfatos

naturais reativos aumenta com o passar do tempo, sendo seu efeito residual equivalente ou mesmo um pouco superior ao dos superfosfatos, estas fontes constituem opção para o agricultor como adubação corretiva (SOUZA; REIN; LOBATO, 2008).

Também se tem verificado que espécies vegetais aumentam a disponibilidade de P no solo, devido às características dessas espécies, como alta eficiência na absorção de P e liberação de ácidos orgânicos, resultando no melhor aproveitamento do P e na possibilidade de disponibilizá-lo para a cultura subsequente (REDEL *et al.*, 2007). Além da mineralização das plantas de cobertura, a solubilização de P no período que precedem as espécies de interesse econômico é uma alternativa de manejo com grande potencial para diminuir o processo de degradação e aumentar a fertilidade dos solos agrícolas, principalmente em relação a redução da utilização de fertilizantes fosfatados em decorrência das fontes inorgânicas não renováveis e a iminente exaustão no próximo século (HAMMOND *et al.*, 2004).

De modo geral, as mudanças na dinâmica das formas de P inorgânico e orgânico do solo dependerão do sistema de manejo de solo, da quantidade de P exportado na colheita, da taxa de reposição do P exportado do sistema e da habilidade das plantas em utilizar as reservas de P nas formas menos lábeis (TIECHER *et al.*, 2012). Dada a complexidade do comportamento do P no solo, é necessário para sua compreensão dividi-lo em frações por meio de soluções extratoras com capacidades distintas (SILVA & RAIJ, 1999). Desta forma, aliado a utilização de plantas de cobertura e a capacidade de solubilizar e alterar a dinâmica das transformações deste nutriente no solo, o fracionamento do P vem sendo utilizado para compreender e estudar suas transformações (HEDLEY *et al.*, 1982).

Quando a fonte de P é de origem orgânica e de fácil decomposição, o seu acúmulo no solo primeiramente pode ocorrer na forma orgânica, e posteriormente ser convertida em forma inorgânica devido à mineralização microbiana (CÔRREA *et al.*, 2004). Caso este material adicionado seja de difícil decomposição o P pode permanecer em formas orgânicas e, conseqüentemente acumular no solo.

Dentre as frações de P, a lábil ou chamada de fracamente adsorvida encontra-se em equilíbrio com a solução do solo possibilitando a recuperação dos níveis de fósforo do solo quando o mesmo é absorvido pelas plantas ou microrganismos, sendo denominado de P-disponível (NAHAS, 1991). Embora esta

quantidade dependa do grau de intemperismo, das características químicas e físicas, da atividade biológica do solo e da vegetação predominante que utiliza o nutriente (RHEINHEIMER *et al.*, 1999). /

Em função dos motivos elencados, a compreensão do acúmulo e da dinâmica de liberação de P ao solo conforme as características dos resíduos vegetais aliando a distribuição das frações orgânicas e inorgânicas de P (total e lábil) junto as fontes de P adicionadas ao solo, levando em consideração inclusive o tipo de solo, tende a auxiliar a escolha de espécies para o uso racional também do tipo de fertilizante fostafatado, principalmente em solos intemperizados, onde a silicatagem tem se verificado alternativa capaz de favorecer a disponibilidade de P.

Objetiva-se estudar as combinações de fontes de P e plantas de cobertura na disponibilização de P às culturas da soja e do milho, bem como na distribuição das frações inorgânicas de P nos solos LVdf e LVd, quando submetido à diferentes corretivos da acidez.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O fósforo nos solos tropicais

O fósforo é um nutriente essencial no metabolismo das plantas na transferência de energia da célula, respiração e fotossíntese, sendo componente estrutural de macromoléculas, genes e cromossomos e integrantes de diversas moléculas químicas, como açúcares fosfatados, nucleotídeos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos, ácido fítico, além de ser parte estrutural do difosfato de adenosina (ADP) e do trifosfato de adenosina (ATP), participando de um grande número de compostos essenciais de vias metabólicas e nos processos de transferência de energia sendo ainda essencial para a divisão celular, devido ao seu papel na estrutura dos ácidos nucleicos (TAIZ & ZEIGER, 2009).

Apesar de sua relativa abundância na crosta terrestre, apresenta-se como um dos nutrientes mais limitantes ao rendimento das plantas. De modo geral, mesmo que o teor total de P no solo seja alto em relação ao necessário para as plantas, apenas uma pequena fração deste está presente em compostos com baixa energia de ligação, que possibilitem sua dessorção dos colóides e disponibilidade às plantas (BARBER, 1995).

Quando o fósforo estiver presente em formas facilmente dessorvíveis, o solo atua como fonte de P, porém o aumento da força de ligação do fósforo com determinados colóides pode fazer com que o solo atue como dreno. Normalmente com o aumento do intemperismo, os solos mudam de fonte para dreno, tornando-se mais eletropositivos e com grande capacidade de adsorver e reter ânions, tais como os fosfatos (NOVAIS e SMYTH, 1999). Neste contexto, destacam-se os Latossolos que, via de regra, apresentam-se geralmente argilosos e com a fração argila com acumulação de óxidos e, portanto, muito pobres em P disponível. A sorção de P, que inclui tanto adsorção na superfície de minerais quanto sua precipitação como fosfatos de baixa solubilidade, é comum em solos ácidos, relativamente ricos em óxidos de Fe (hematita e goethita) e de Al (gibbsita), como é o caso geral dos Latossolos (Motta *et al.*, 2002). Segundo Schaefer *et al.* (2003), esta capacidade de adsorção é fortemente correlacionada com o conteúdo de Al_2O_3 e formas de Al nos microagregados do solo, com menor contribuição dos percentuais de Fe_2O_3 . Almeida *et al.* (2003), constataram em Latossolos do extremo-sul do Brasil altos teores de fósforo total, com predomínio das formas associadas aos óxidos de ferro, ligado a

compostos orgânicos, adsorvido à superfície de óxidos e associado a compostos de ferro de baixa cristalinidade.

Segundo Santos *et al.* (2008), a dinâmica do fósforo no solo está associada a fatores ambientais que controlam a atividade dos microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, e às propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo. Assim, em Latossolos, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral com alta energia e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente, as quais são enquadradas como fosfatos lábeis e não-lábeis, de acordo com o grau de estabilidade. A fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando ele é absorvido por plantas ou por microrganismos. Por isso, as frações mais lábeis são dependentes do grau de intemperização do solo, da mineralogia, da textura, do teor de matéria orgânica, das características físico-químicas, da atividade biológica e da vegetação predominante (WALKER & SYERS, 1976; CROSS & SCHLESINGER, 1995). Portanto, os processos geoquímicos e biológicos transformam os fosfatos naturais em formas orgânicas e inorgânicas estáveis e transferem o fósforo entre os compartimentos do ambiente.

O P é absorvido pelas plantas preferencialmente na forma de íon fosfato (H_2PO_4^-), mas, no solo, dependendo da natureza do composto a que está ligado o fósforo pode estar na forma de fósforo orgânico (Po) ou fósforo inorgânico (Pi). O grupo do fósforo inorgânico pode ocorrer em solução (P-solução), precipitado com Al^{3+} , Fe^{2+} e Ca^{2+} ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila. As formas precipitada e adsorvida, pelo menos em parte, estão em equilíbrio com a solução e compõem a fração lábil de P no solo (P lábil). A fração não-lábil é composta pelo P na forma de compostos de baixa solubilidade (P mineralogicamente estável) ou adsorvido às partículas do solo, formas que não estão em equilíbrio imediato com o P em solução (NOVAIS; SMYTH, 1999).

As formas predominantes do P em solos ácidos, muito intemperizados, são as inorgânicas adsorvidas em minerais de argila e sesquióxidos de Fe e Al, e as associadas à matéria orgânica, como seu constituinte. A adsorção do fosfato aos óxidos de Fe e Al ocorre, principalmente, nas formas de baixa cristalinidade e com alto desbalanço de cargas (SANYAL; DE DATTA, 1991). Esta adsorção ocorre nos sítios ácidos de Lewis, nos quais os grupos $-\text{OH}$ e $-\text{OH}^{2+}$ ligados monoordenadamente ao metal (Fe ou Al) são trocados pelo fosfato, processo

conhecido como troca de ligantes. Essa ligação possui alta estabilidade e o fosfato tem sua solubilidade muito reduzida. O fósforo orgânico pode constituir de 20% a 80% do fósforo total do solo e, nos solos tropicais, é fonte de fósforo às plantas e deve ser levado em consideração em estudos envolvendo a sua dinâmica e biodisponibilidade; as principais formas já identificadas são os fosfolipídios, ácidos nucleicos e outros ésteres fosfato (RHEINHEIMER & ANGHINONI, 2003). As principais formas já identificadas são os fosfatos de inositol, que compõem de 10 a 80% do Po total, os fosfolipídios (0,5 a 7%), os ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteres fosfato (>5%) (DALAL, 1977). A estabilidade destes compostos é dependente de sua natureza e de sua interação com a fração mineral, pois estes mesmos compostos são usados como fonte de carbono e elétrons pelos microrganismos, tendo como resultado a mineralização e a disponibilização do Po.

2.2 Corretivos da acidez do solo

Os solos podem ser naturalmente ácidos em razão da pobreza do material de origem em cátions básicos, ou por condições de pedogênese ou de formação de solo que favoreceram a remoção de elementos químicos do solo (RAIJ, 1983). A solubilização da rocha, com posterior perda de bases trocáveis do solo associada à retenção preferencial de cátions de maior valência, como o Al, nos sítios de troca das argilas, óxidos e hidróxidos de Fe e Al e da matéria orgânica caracteriza o processo de acidificação do solo, comum a solos de regiões tropicais e subtropicais (MEURER *et al.*, 2010). Além disso, o processo de acidificação do solo pode ser acelerado ou intensificado em sistemas agrícolas mediante processos de manejo de solos que levam à perda de bases e, portanto, promovem a acidificação (QUAGGIO, 2000).

Em condições de acidez elevada podem ocorrer teores de Al e Mn em níveis tóxicos, associados às deficiências de Ca, Mg, K e P, e como consequência, há redução da produtividade das plantas cultivadas, pois, a deficiência de Ca e a toxidez de Al são as principais limitações químicas para o crescimento radicular, prejudicando a absorção de água e nutrientes pelas plantas (MEURER *et al.*, 2012).

Considerando-se que a acidez do solo se deve à presença de íons H^+ livres, gerados por componentes ácidos presentes no solo, a neutralização dessa acidez consiste em neutralizar os prótons, o que é feito pelo ânion OH^- . Para tal, os corretivos de acidez devem ter componentes básicos para gerar OH^- e promover a

neutralização (ALCARDE; RODELLA, 2003), como carbonatos, hidróxidos ou silicatos de cálcio e/ou de magnésio, capazes de neutralizar a acidez dos solos e, ainda, levar nutrientes vegetais até eles, principalmente Ca e Mg (ALCARDE, 1992).

2.2.1 Calcário

No Brasil, a rocha calcária moída é o material natural comumente usado para a correção da acidez do solo, tendo como constituintes neutralizantes o CaCO_3 e o MgCO_3 , sendo classificados em calcário dolomítico (com teor de MgCO_3 acima de 25%) e calcário calcítico (com teor de MgCO_3 entre 10 a 25%) (DEUS, 2010; ALCARDE; RODELLA, 2003).

Na presença de água, o calcário dissolve-se e os carbonatos dissociam-se e corrigem a acidez do solo. Assim, o calcário libera Ca^{2+} , Mg^{2+} e CO_3^{2-} , dos quais o CO_3^{2-} constitui-se como a base química, ou seja, o componente que proporciona a formação de OH^- (e posteriormente o HCO_3^-). O valor da constante de ionização ($K_b=2,2 \times 10^{-4}$) mostra que o CO_3^{2-} é uma base fraca, isto é, a reação de formação de OH^- é relativamente lenta e parcial. O OH^- produzido neutralizará o H^+ da solução do solo, responsável pela acidez (ALCARDE; RODELLA, 2003). Os íons Ca^{2+} e Mg^{2+} deslocam o íon Al^{3+} adsorvido às partículas coloidais do solo para a solução de equilíbrio. Enquanto isso, o pH do meio aumenta e, os íons HCO_3^- , provocam a dissociação dos íons H^+ , formando ácido carbônico que é a mistura de água e gás carbônico. Com a elevação do pH, os íons Al^{3+} hidratados sofrem hidrólise. Os íons H^+ , provenientes da hidrólise do Al^{3+} são neutralizados por hidroxilas oriundas da dissolução do calcário (QUAGGIO, 2000).

Para que ocorra a lixiviação de cátions, é necessário que haja no solo íons acompanhantes, como o cloreto, sulfato, nitrato, formiato, bicarbonato, entre outros, sendo esse um dos motivos que explicam a baixa mobilidade no solo de Ca aplicado na forma de carbonato, já que o ânion CO_3^{2-} reage com o H^+ formando CO_2 , que evolui para a atmosfera (MIYAZAWA *et al.*, 2000).

Em decorrência da baixa solubilidade do calcário, sua ação é lenta e restrita às camadas superficiais do solo se aplicado em superfície. Rheinheimer *et al.* (2000) verificaram que a correção da acidez em subsuperfície só ocorreu quando o pH, na zona de dissolução do calcário ficou em torno de 5,5. De acordo com os autores, enquanto existirem cátions ácidos (H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}), a reação de neutralização da acidez ficará limitada à camada superficial, retardando o efeito na subsuperfície.

Desta forma, a calagem é uma prática rotineira e indispensável para neutralizar a acidez e aumentar a produtividade agrícola, devido seus efeitos na correção do solo, com reflexos na maior eficiência das raízes em absorção de água e nutrientes, com diminuição nas perdas de bases por lixiviação, diminuição na fixação do fósforo, precipitação do alumínio, manganês e ferro além de fornecer cálcio e magnésio (VITTI *et al.*, 1996).

2.2.2 Silicato

Além do calcário, outros materiais podem ser utilizados como corretivos da acidez do solo, desde que contenham um “constituente neutralizante” ou “princípio ativo”, óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio e/ou magnésio (ALCARDE, 1985). Os silicatos de Ca e Mg, por apresentarem composição semelhante a dos carbonatos, podem substituir o calcário com vantagens (CORRÊA *et al.*, 2007), podendo sua recomendação de aplicação ser baseada em qualquer um dos métodos utilizados para recomendação de calagem (KORNDÖRFER *et al.*, 2004).

No caso dos silicatos a acidez do solo é neutralizada por meio da sua base SiO_3^{2-} que reage com a água e libera íons OH^- (ALCARDE; RODELLA, 2003). A base SiO_3^{2-} também é fraca ($K_{b1} = 1,6 \times 10^{-3}$), mas é mais forte que a base CO_3^{2-} ($K_{b1} = 2,2 \times 10^{-4}$). Os OH^- neutralizam o H^+ e o Al^{3+} fitotóxico e, ocorre diminuição da concentração da acidez potencial (PRADO *et al.*, 2001). A eficiência de correção dos silicatos, á semelhança do calcário, varia em função da granulometria, reatividade, dose, tipo de solo e o tempo de contato do material com o solo (DEUS, 2010).

O silicato de cálcio é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de cálcio ($\text{CaCO}_3 = 0,014 \text{ g dm}^{-3}$; $\text{CaSiO}_3 = 0,095 \text{ g dm}^{-3}$), sendo uma boa opção para aplicação superficial no SSD (ALCARDE; RODELLA, 2003; CARVALHO-PUPATTO *et al.*, 2004). Tal característica lhe confere a vantagem de reduzir a acidez do solo mais rapidamente que o calcário, inclusive em profundidade (CORRÊA *et al.*, 2007). Inclusive, os silicatos podem saturar os sítios de adsorção de P nos sesquióxidos de Fe e Al nos solos, tornando esse elemento mais disponível às plantas (PRADO *et al.*, 2001).

No Brasil, as escórias de siderurgia, subproduto das indústrias do ferro e do aço, são uma das fontes mais abundantes e de baixo custo dos silicatos. A indústria

gera, em média uma tonelada de escória de alto forno para cada quatro toneladas de ferro-gusa produzidas, totalizando uma produção nacional de 6,25 milhões de toneladas de escória por ano (PREZOTTI; MARTINS, 2012). Porém, o uso deste material na agricultura ainda é pequena comparada a países como Estados Unidos, Japão e China, obrigando as siderúrgicas a estocar este material em pátios, tornando-se um problema ambiental em virtude da possibilidade de lixiviação de compostos químicos para o lençol freático.

Wutke e Gargantini (1962) iniciaram os estudos com o uso agrícolas de silicatos como corretivos da acidez do solo através de duas escórias de siderurgia, as quais mostraram-se eficientes na neutralização da acidez, uma vez que a granulometria mais fina estudada fosse utilizada.

O uso das escórias no solo tem demonstrado, além do aumento de pH e redução do H⁺Al, incrementos nos teores de Ca e Mg (PRADO; FERNANDES, 2000, 2003), Si no solo (ANDERSON *et al.*, 1987; WINSLOW, 1992), e na disponibilidade de P (PRADO *et al.*, 2002), além de reduzir a toxicidade por Fe, Mn e Al às plantas (KORNDÖRFER *et al.*, 2002).

O aumento nos teores de Ca e Mg no solo em razão da utilização da escória pode apresentar efeito positivo no desenvolvimento de raízes, especialmente em relação ao Ca, uma vez que são bem conhecidos os efeitos positivos deste elemento no crescimento radicular (CAIRES *et al.*, 2001).

Acréscimos nos teores de P do solo em decorrência da aplicação de doses de escória de siderurgia foram verificados por Vidal e Prado (2011), Prado e Fernandes (2001) e Crusciol *et al.* (2007). Dois fatores são encontrados na literatura que podem explicar essa característica da escoria: a correção da acidez do solo pelos constituintes desse material e a competição entre Si e P pelos mesmos sítios de adsorção de P no solo, a qual não ocorre quando utiliza-se calcário (BALDEON, 1995; CARVALHO *et al.*, 2000). Para Vidal (2005), a contribuição da escória na disponibilidade de P se justificaria pelo duplo efeito desse material, com corretivo da acidez do solo e como fertilizante, fornecendo, inclusive, Si.

O uso das escórias, através do ânion silicato, poderia configurar em estratégia para aumentar a eficiência da adubação fosfatada pela competição do silicato com o ânion fosfato pelos mesmos sítios de adsorção do P (FASSBENDER, 1987). Porém, para Lopes (1977), a eficiência do silicato no incremento de P disponível no solo não

estaria na capacidade de troca dos ânions silicato por fosfatos, mas sim, na saturação ou no bloqueio destes sítios de adsorção de P pelo ânion silicato.

2.3 Fontes de fósforo

Em meados do século XIX, deu-se o início da utilização de adubos fosfatados, a medida que o homem percebeu que sua adição às culturas auxiliava a produção agrícola, tendo como principal fonte de P ossos moídos, constituídos basicamente de fosfato de Ca (ALBUQUERQUE, 2001). Em decorrência da necessidade correção dos teores de P no solo mais rapidamente, novas fontes foram incorporadas aos sistemas de adubação, sendo estas solúveis e prontamente disponibilizadas as culturas, como os superfosfatos e os fosfatos de amônio.

No Brasil, as reservas totais de rocha fosfática estão distribuídas principalmente nos Estados de Minas Gerais (73,8%), Goiás (8,3%) e São Paulo (7,3%), os quais representam 89,4% do total existente no país, seguidos dos Estados de Santa Catarina, Ceará, Pernambuco, Bahia e Paraíba, perfazendo os 10,6% restantes (DNPM/DIRIN, 2001). Os fosfatos naturais (rocha fosfática moída), termofosfatos (processo térmico), fosfatos totalmente acidulados (acidulação total) e os fosfatos alternativos (parcialmente acidulados, compactados e outros) são as principais fontes de P (PROCHNOW, 2003).

Os minerais que compõem as rochas fosfáticas, basicamente são as apatitas e as fosforitas, ambas são fosfatos de cálcio, no entanto, as primeiras contêm Oh, F e Cl e as fosforitas, CO_3^{2-} , Mg e Na (LOPES *et al.*, 2004). As apatitas são originárias de ação vulcânica ao longo de zonas de fraqueza na crosta terrestre (ígneas ou metamórficas), como por exemplo no Brasil Central, Canadá, Rússia e África do Sul, resultantes da intrusão do magma e rochas cristalinas, formando rochas que podem conter até 37% de P_2O_5 , com teores médios de 28% a 30% (MALAVOLTA, 1981).

Já as fosforitas são originárias de depósitos sedimentares no leito dos oceanos, áreas que posteriormente tornaram-se solos, como no norte da África, China, Oriente Médio e Estados Unidos (LOPES *et al.*, 2004). Sua formação permeia três hipóteses levantadas por Malavolta (1981): a) acumulação lenta de esqueletos e ossos de animais marinhos, sendo esta hipótese sustentada pela real presença de restos de animais nestes depósitos; b) formação de depósitos devido a precipitação de fosfatos no fundo de mares pouco profundos, onde o plâncton atuaria como acumulador de P dissolvido até atingir uma concentração suficiente para que

precipitasse fosfato mineral insolúvel; c) fosfatos dissolvidos em águas oceânicas precipitaria no encontro de correntes marinhas em condição de temperatura ideal e de elevado teor de Ca.

As apatitas (fosfato tricálcio) são as principais fontes naturais de P, e embora a utilização de fosfatos naturais com fonte de P seja uma prática antiga, a aplicação direta de rocha fosfatada na agricultura representa um percentual muito baixo em comparação aos demais fertilizantes, consequência de sua baixa solubilidade. Os fosfatos de rocha, extraídos por mineração superficial contém cerca de 15% de P_2O_5 e precisam ser concentrados para serem usados como fertilizantes, sendo necessários procedimentos químicos (via úmida) ou térmicos (via seca). Na via úmida, a rocha sofre ataque do ácido sulfúrico, originando o ácido fosfórico, a partir do qual se pode produzir os superfosfatos triplos e os fosfatos de amônio (fosfato de monoamônio – MAP e fosfato de diamônio – DAP), caracterizados como fontes solúveis de P (FRANZINI, 2009). Essas fontes solúveis ao se dissolverem na água geram ácido fosfórico (H_3PO_4) e fosfato ácido de cálcio ($CaHPO_4$), formando uma solução ácida no solo que exerce um efeito marcante na disponibilidade de P para as plantas, já que o H_3PO_4 originado concorre para a dissolução dos óxidos de Fe, Al e Mn, acelerando o processo de fixação de P (BELTRÁN *et al.*, 1998).

O superfosfato simples (SFS) é obtido do tratamento da rocha fosfática com ácido sulfúrico concentrado formando uma mistura de fosfato monocálcico com gesso. Contém em torno de 18% de P_2O_5 solúvel em citrato de amônio mais água (CNA+água), dos quais cerca de 90% é solúvel em água, além de 12% de enxofre e 26% de CaO. Possui como principais vantagens o fornecimento de P, Ca e S, a formação de gesso agrícola como resíduo, fato que pode gerar correção de área sódicas e melhorar o ambiente radicular em profundidade e apresenta elevada solubilidade em água (VITTI *et al.*, 2003).

A elevada quantidade de ácido sulfúrico no tratamento da rocha fosfática gera ácido fosfórico e gesso, o qual acumula-se como subproduto, enquanto que o ácido fosfórico é separado por filtração para ser usado na produção do superfosfato triplo (SFT) e de fosfatos de amônio (MAP e DAP) (BENEDITO, 2007). Após a separação do gesso e acidulação de novo lote de rocha com ácido fosfórico origina-se o fertilizante SFT com aproximadamente 41% de P_2O_5 solúvel em CNA + água, dos quais cerca de 90% é solúvel em água. Embora o SFT tenha elevado teor de P,

apresenta a desvantagem de menor teor de CaO (15%) e de não conter enxofre (VITTI *et al.*, 2003).

A reação da amônia com o ácido fosfórico dá origem aos fosfatos de amônio, sendo eles o monoamônio fosfato (MAP) ou o diamônio fosfato (DAP). O MAP possui, aproximadamente, 11% de N e 48% de P_2O_5 solúvel em CNA + água e o DAP, 18% de N e 45% de P_2O_5 . Os mesmos têm sido utilizados como fertilizantes simples ou para preparo de formulações de alta concentração, além de serem utilizados para o preparo de fertilizantes fluidos e em fertirrigação, devido a sua alta solubilidade.

Os termofosfatos, fosfatos naturais brasileiros e fosfatos naturais reativos correspondem a 5% do P_2O_5 utilizado como fonte de P no Brasil. Os termofosfatos apresentam mais de 90% do P total solúvel em ácido cítrico e na forma de pó possuem índice de eficiência agronômica equivalente aos fosfatos solúveis em água. Esses fertilizantes são obtidos através do tratamento térmico das rochas fosfatadas mais silicatos, ou ainda terem micronutrientes misturados durante o processo de fusão, originando um fertilizante enriquecido (FURTINI NETO *et al.*, 2001).

Os fosfatos de alta reatividade correspondem a mais de 90% do P_2O_5 utilizado na agricultura brasileira, apresentam alta eficiência agronômica em curto prazo e elevado custo por unidade (CAIONE *et al.*, 2011). Há forte competição entre o solo e a planta pelo P destes fosfatos (NOVAIS *et al.* 2007). Tradicionalmente, tem-se recomendado a aplicação das fontes solúveis, de maneira localizada, no sulco de plantio (PRADO *et al.* 2001).

Quando um fertilizante fosfatado solúvel em água é adicionado ao solo a reação no solo é rápida e os novos produtos formados conseguem manter uma solução saturada em P em torno da região de dissolução do grânulo. Isso cria um gradiente osmótico que provoca o deslocamento da água em sua direção, e ao mesmo tempo há a difusão da solução da região mais concentrada para regiões de menor concentração, próximas, garantido soluções com P suficiente para atender a demanda de plantas quando o sistema radicular atinge essas regiões. O evento prossegue até que haja diluição da solução com P, ou se completarem as reações com os constituintes do solo e extinga o potencial osmótico (KAMINSKI; PERUZZO, 1997).

Embora a utilização de fontes de P de elevada solubilidade seja mais eficiente a curto prazo, a literatura relata que essas fontes fosfatadas de alta solubilidade são

rapidamente convertidas em formas indisponíveis para as plantas quando adicionadas aos solos tropicais ácidos, de alta capacidade de fixação de P (PROCHNOW *et al.*, 2003).

No caso dos fosfatos naturais, a dissolução depende da superfície de contato com o solo, sendo aumentada se o fertilizante for aplicado em área total e incorporado (HOROWITZ; MEURER 2004). Fertilizantes fosfatados de baixa solubilidade em água e boa solubilidade em ácidos fracos, como o ácido cítrico e citrato neutro de amônio, liberam o P no solo mais lentamente, diminuindo a sua fixação no solo.

Os fosfatos naturais brasileiros (Araxá, Patos de Catalão e outros) possuem dissolução no solo muito lenta, sobretudo em condições de acidez corrigida para culturas anuais (pH em água ao redor de 6,0), tendo sua eficiência agrônômica reduzida, em média 25% para culturas anuais, em relação aos fosfatos solúveis em água, nos primeiros anos depois da aplicação (SOUZA; LOBATO, 2002). Os fosfatos naturais reativos (Gafsa, Carolina do Norte, Arad, Argélia, Daoui e Marrocos), comercializados no Brasil na forma farelada, apresentam índice de eficiência agrônômica médio para culturas anuais no primeiro cultivo por volta de 50%, evoluindo nos anos seguintes para aproximadamente 100% quando comparados ao superfosfato triplo. Para pastagens, esses fosfatos tem apresentado eficiência agrônômica inicial superior à obtida com culturas anuais (SOUZA *et al.*, 1999).

2.4 Formas de P em solos tropicais

Os minerais fosfatados primários são a fonte de P nos sistemas naturais, devendo haver o rompimento de sua estrutura cristalina para liberação, a qual ocorre mediante a intemperização desses minerais primários, dependendo dos fatores e processos de formação do solo durante a pedogênese. No decorrer desses processos, o P é então liberado para a solução do solo onde é readsorvido aos colóides e absorvido pelos organismos e plantas, caracterizando esta fase como de maior biodisponibilidade, uma vez que os colóides inorgânicos são pouco intemperizados e a quantidade de sítios de adsorventes é pequena, sendo o P retido com baixa energia, facilitando seu retorno a solução do solo. Ao mesmo tempo, resíduos de organismos são depositados no solo, originando nova forma de P, o fósforo orgânico (Po). Com o passar do tempo, o intemperismo avança e os minerais fosfatados vão sendo degradados, reduzindo sua contribuição ao sistema e os

minerais do solo vão perdendo sua cristalinidade, aumentando os sítios de adsorção aniônica, alterando o caráter da fase sólida mineral do solo, de fonte de P à dreno de P, em resposta a formação de complexos de alta energia, dificultando a reversibilidade, conseqüentemente, diminuindo a biodisponibilidade do fósforo (GATIBONI, 2003).

Essas são características dos solos desenvolvidos, como os solos tropicais, onde a mineralização do P torna-se a principal fonte de tamponamento de P, uma vez que os colóides inorgânicos atuam principalmente como dreno de P e competem com as plantas pelo P. Sanches & Logan (1992) estimam que 25% dos solos tropicais e subtropicais, caracterizados pelo alto grau de intemperismo, apresentam deficiência acentuada de fósforo, tornando este nutriente o mais limitante para a produção agrícola.

O processo de adsorção pode acontecer preferencialmente, segundo uma ordem de predomínio dos minerais de argilas 2:1, seguido pelas argilas 1:1 e óxidos de Fe e Al (FOX; SEARLE, 1978). A adsorção de fosfato pelos solos é influenciada pelos minerais que apresentam grupamentos superficiais FeOH e AlOH, nos quais o fosfato pode ser adsorvido por meio de troca de ligantes com o estabelecimento de ligações covalentes (MESQUITA FILHO; TORRENT, 1993). Segundo Raij, 2004, os solos brasileiros são ricos em óxidos hidratados de Fe e Al os quais, juntamente com a caulinita, constituem a maior parte da composição mineralógica da fração argila do solo, a parte mais ativa na qual ocorrem as reações do P com estes compostos.

Além dos óxidos de Fe e Al, o fósforo pode ser adsorvido por minerais que contem Ca, através da quimissorção do fosfato ao mineral, originando o fosfato de cálcio amorfo, o qual passa por processo de cristalinização e, posterior crescimento do cristal pelo acréscimo de novas camadas, caracterizando o “envelhecimento” do fosfato de Ca (PARFITT, 1978).

As formas precipitadas de fósforo, entre as quais strengtita ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), variscita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fluorapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$), hidroxiapatita ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), fosfato dicálcico dihidratado ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e fosfato octacálcico ($\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) mantém os íons H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} na solução do solo na faixa de pH entre 5,0 e 7,0. Em pH baixo (menor que 5,0), há maior ocorrência do fósforo nos minerais que contém ferro e alumínio, enquanto em pH maiores, isso acontece preferencialmente nos com cálcio, sendo que a variação do pH pode promover a dissolução e formação de outros compostos (GATIBONI, 2003).

O fato de que o fósforo inorgânico do solo pode ocorrer em várias formas, dependendo do grau de intemperização, do uso do solo e com energias de ligação diferentes, se torna necessário o conhecimento das formas predominantes deste nutriente no sistema. A ocorrência e a participação na biodisponibilidade pelas formas de P têm envolvido vários pesquisadores nos últimos anos. Essas técnicas passaram a ser usadas com mais frequência no Brasil a partir do final da década de 1980 e início da década de 1990 e são amplamente empregadas no estudo do comportamento de metais pesados e elementos essenciais ao crescimento das plantas (SOUZA FILHO, 2014).

Esses métodos são, na sua maioria, baseados na extração do elemento com ácidos, bases, sais e resinas de trocas iônicas. Os métodos de fracionamento do P do solo têm como pressuposto a extração sequencial em uma amostra de solo, com uma série de reagentes ou soluções extratoras com seletividade para dissolver as diversas formas de P, baseando-se, principalmente, na natureza e força das interações entre o P e as fases inorgânica e orgânica do solo, além dos microrganismos (GATIBONI *et al.*, 2013).

A base teórica para o estudo e desenvolvimento de metodologias de extração de P do solo foi a técnica do fracionamento de fósforo do solo desenvolvida por Chang & Jackson (1957) e a partir dele, vários outros métodos de extração foram desenvolvidos. Hedley *et al.* (1982) desenvolveram um método de fracionamento que contempla as frações orgânicas e inorgânicas, além de introduzir a ideia de sua labilidade.

Chang & Jackson (1957), presumiram que a utilização de diferentes extratores poderiam, devido ao seu modo de ação, extrair seletivamente as diferentes formas de fósforo, permitindo classificar o fósforo do solo em quatro grandes grupos: fosfatos de alumínio, fosfatos de ferro, fosfatos de cálcio e fosfatos oclusos (fosfatos precipitados no interior de oxihidróxidos de ferro e alumínio ou incapazes de serem detectados com os extratores usados). Estas formas são identificadas de acordo com o extrator usado, na seqüência $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{F}$, NaOH , H_2SO_4 e $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$. Na seqüência deste método de fracionamento, a primeira extração remove o P solúvel e fracamente adsorvido. Na etapa seguinte, utiliza-se a habilidade complexadora do F^- contido no NH_4F para separar as formas Al-P e Fe-P, seguida da remoção do Fe-P com NaOH e do P-ocluso por DCB. Já o Ca-P, o qual é insolúvel em DCB, é extraído com H_2SO_4 . Porém, esta técnica não

identifica separadamente as formas orgânicas e, principalmente, não estima a labilidade das formas extraídas.

Essas formas de P ocorrem em todos os solos; no entanto, existe uma variação na proporção entre elas em função das características dos solos. Em solos ácidos normalmente predominam as formas Al-P, Fe-P e P-ocluído, enquanto solos neutros e levemente ácidos usualmente contêm as quatro frações em quantidades semelhantes e solos alcalinos e calcários são freqüentemente dominantes em Ca-P. De um modo geral, Ca-P e Al-P são consideradas as formas de maior probabilidade de ocorrência em solos antes que o intemperismo químico atue severamente (RANNO *et al.*, 2007). Em um avançado estágio de intemperismo, o Fe-P aumenta as custas do Al-P e Ca-P, com posterior oclusão de parte do Al-P e FeP pelo revestimento com óxidos de ferro (PATRICK JUNIOR; MAHAPATRA, 1968). Os minerais mais estáveis formados entre Al-P, Fe-P e Ca-P são a variscita, strenguita e a apatita, respectivamente (SAH; MIKKELSEN, 1986).

Solos como os de cerrado, mais intemperizados, em geral, é observada a predominância de P-Fe e de P-Al sobre P-Ca (REIS, 2009). Novais e Kamprath (1978), avaliando as formas de P mais lábil em solos da Carolina do Norte (EUA), verificaram que a maior liberação de P era proporcionada por P-Al, seguida de longe pelo P-Fe e, finalmente, pelo P-Ca. Porém, em função da variação do tipo de solo, qualquer umas dessas formas de P pode ser importante (NOVAIS; SMITH, 1999).

Motta *et al.* (2002), estudando diferentes tipos de Latossolos, observaram que à medida que esses solos foram sendo cultivados e concomitantemente adubados, ocorreram aumentos predominantes das frações P-Fe e P-Al.

Takahashi e Anwar (2007), ao estudarem um Andossolo, após 23 anos de cultivo e adubação, observaram que todas as três frações de P aumentaram após o cultivo de trigo e, que a fração P-Al foi a que obteve o aumento mais expressivo, seguida por P-Fe, permitindo que concluíssem que o trigo pode absorver P do solo proveniente de qualquer uma dessas formas.

Moreira *et al.* (1991), avaliando o efeito do tempo de contato do fósforo com o solo verificaram, por meio do fracionamento proposto por Chang e Jackson (1957), que, inicialmente, o maior acréscimo foi na fração P ligado ao alumínio (P-Al) e que com o passar do tempo houve redução nessa fração e aumento na fração P ligado a ferro (P-Fe). Percebeu-se que o decréscimo nos teores de P recuperado pelos extratores que buscam avaliar o P disponível às plantas, apresentou o mesmo

padrão de decréscimo da fração P-Al. Isso sugere que essa fração estaria associada à fração mais lábil desses solos, em função de a solubilidade dos compostos de alumínio ser maior nesse pH e, conseqüentemente, acontece liberação do P, enquanto esse comportamento não ocorre com a fração P-Fe, que, por conseqüência, corresponderia à fração não lábil do solo e seria responsável por reter o P oriundo da solubilização da fração P-Al. Ranno *et al.* (2007), forma Fe-P é a principal forma de P inorgânico em solos de várzea, a qual aumenta sua proporção com o alagamento do solo.

Avaliando as frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo de Cerrado com diferentes históricos de uso, Carneiro *et al.* (2011), observaram que as aplicações de fósforo aumentaram as formas orgânicas e inorgânicas de P no solo, no entanto, os aumentos nas formas inorgânicas foram maiores nos solos com histórico de cultivo e adubação e nas formas orgânicas foram maiores nos solos adjacentes, sem histórico de cultivo e adubação. Lacerda *et al.* (2013), avaliando a dinâmica do P inorgânico em solos de Cerrado após aplicação de fosfato reativo de Arad, encontraram alta correlação entre a fração P-Al e os extratores Mehlich-1, resina de troca iônica, ácido cítrico e Olsen, indicando que essa seria a fração responsável pelo fósforo disponível em solos já cultivados. Já para os solos não cultivados, ou seja, aqueles que serão cultivados pela primeira vez após a abertura da área, os resultados indicaram que as frações P-Al e P-Fe são responsáveis pelo P disponível.

Negassa e Leinweber (2009) apontam que a associação do fracionamento químico com outras técnicas como ressonância magnética nuclear (RMN) e X-ray Absorption Near Edge Structure (XANES) pode oferecer maiores detalhes e mais informações sobre as espécies por trás das frações e auxiliar no avanço do conhecimento da dinâmica do P no solo.

Técnicas baseadas na luz síncrotron passaram a ser utilizadas com maior frequência desde o início da década de 1990, em diversos campos da ciência. A luz síncrotron é uma radiação eletromagnética emitida por elétrons em velocidade próxima a da luz, sendo forçados a mudar de direção sob ação de um campo eletromagnético. Segundo Hesterberg (2010), o uso desta técnica fundamentou-se no fato de ser uma análise direta e não destrutível utilizada na ciência do solo para especiação química de contaminantes e nutrientes, na mineralogia e geoquímica. Esta técnica promove a obtenção de informações estruturais, muito úteis para a

especiação química de um elemento, incluindo minerais, sólidos não-cristalinos ou interfaces adsorvidas.

O acrônimo XAS engloba XANES – absorção de raio-X na estrutura de pré-borda e EXAFS – absorção de raio-X de estrutura fina ampliado. A técnica de XANES pode ser usada para determinar o estado da valência e a coordenação geométrica, enquanto que o EXAFS pode ser usado para determinar a estrutura molecular local de um elemento particular contido em uma amostra (KELLY; HESTERBERG; RAVEL, 2008).

O método de XANES (espectroscopia de alta resolução na borda de absorção) pode indicar a estrutura e o grupo químico do elemento em estudo em nível molecular (HESTERBERG *et al.*, 2006; BEAUCHEMIN *et al.*, 2003; LIU *et al.*, 2011; PRIETZEL *et al.*, 2013). Portanto, é capaz de discriminar as associações das frações de P com diferentes metais, porém, não consegue discriminar com acurácia a absorção de P com certos minerais e com a matéria orgânica, porque estas espécies de P tem a energia dos espectros muito similares (PEAK *et al.*, 2002).

As técnicas de espectroscopia de absorção, como a espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES) são ideais para a especiação em estado sólido de espécies químicas presentes em misturas heterogêneas, como o solo, podendo analisar materiais com diferentes graus de cristalinidade, tornando-se uma importante ferramenta no estudo das consequências dos efeitos dos manejos no solo na cristalinidade dos minerais (ABDALA *et al.*, 2015).

A avaliação e o entendimento das características espectrais em termos de coordenação molecular local são importantes para identificar as espécies químicas de P no solo e como essas formas podem diferir de modelos análogos (HESTERBERG, 2010). Em alguns casos, apenas pela visualização dos espectros é possível identificar algumas feições que são características da associação de P com determinados elementos e prever de antemão a sua participação no espectro a ser avaliado (SOUZA FILHO, 2014).

Para o estudo do solo, o uso de XANES vinha sendo aplicado especialmente ao estudo de enxofre, especiação de metais e contaminantes, mas Hesterberg *et al.* (1999) mostraram a viabilidade do uso desta abordagem para a identificação direta de algumas espécies de P no solo. Os autores avaliaram o comportamento de diversos espectros de diferentes minerais com P na sua composição ou adsorvidos a eles. A conclusão desse trabalho foi animadora, pois concluíram que os espectros

obtidos de cada material avaliado continham características espectrais únicas e que, por esse motivo, a técnica poderia ser utilizada para distinguir diferentes formas de P no solo.

Dada a importância do fósforo, os mecanismos pelos quais ele é suprido ou removido natural ou artificialmente dos sistemas tem sido foco de muitos estudos e, a chave para a compreensão do suprimento, remoção e transformações do P em todos os sistemas é o conhecimento de sua especiação (INGALL *et al.*, 2010).

Estudos recentes tem demonstrado que o XANES fornece um excelente caminho para o estudo da mineralogia e transformações do P em sistemas naturais e agrícolas (DIAZ *et al.*, 2008; SEITER *et al.*, 2008; BEAUCHEMIN *et al.*, 2003; PEAK *et al.*, 2002; AJIBOYE *et al.*, 2007; HESTERBERG *et al.*, 1999; SATO *et al.*, 2005; EVEBORN *et al.*, 2009; KRUSE; LEINWEBER, 2008).

Após a iniciativa de se utilizar o XANES para estudos voltados aos solos, houve a necessidade de trabalhos acerca dos padrões mineralógicos, então trabalhos como Hesterberg *et al.* (1999), Beauchemin *et al.* (2003), Ingall *et al.* (2010) e Kelly; Hesterberg; Ravel (2008) elucidaram as pesquisas sobre P no solo e o uso desta tecnologia para fins de análise no solo.

Estudos sobre o comportamento do P em cronossequências (PRIETZEL *et al.*, 2013), lodo de esgoto (HUANG; TANG, 2015); aplicação de esterco em estudos de longa duração (ABDALA *et al.*, 2015; SATO *et al.* 2005); sorção de P a óxidos de Fe e Al (KHARE *et al.*, 2003) são alguns dos trabalhos mais produzidos com o uso de XANES.

Beauchemin *et al.* (2003), avaliando as formas de P em solos que receberam aplicações do nutriente, perceberam, através do fracionamento químico que o P estava associado em maior quantidade com Al e/ou Fe nos solos de pH baixo e ao Ca nos solos alcalinos. As mesmas amostras foram submetidas ao XANES e os resultados demonstraram que, nos solos ácidos de 44 a 88% do estava associado com Al e/ou Fe, sendo que a diferença corresponde ao P ligado ao Ca, demonstrando a existência de P ligado ao Ca em solos ácidos. Já nos solos alcalinos, 82 a 85% do P estava ligado ao Ca.

Liu *et al.* (2013) ao associarem as técnicas de fracionamento químico de P e XANES, concluíram que a combinação das mesmas foi essencial para o melhor entendimento da dinâmica do P nos solos estudados, ressaltando que da associação delas podem resultar refinamentos nas técnicas mais simples, como o

fracionamento químico, permitindo melhorar a compreensão sobre o comportamento do nutriente, para melhorar o seu o manejo no solo.

2.5 Plantas de cobertura

Os resíduos de plantas de cobertura podem constituir importante reserva de nutrientes para as culturas subsequentes. Diversas espécies de plantas de cobertura podem ser utilizadas a fim de melhorar a ciclagem de nutrientes no solo.

A disponibilização destes pode ser rápida e intensa ou então, lenta e gradual, conforme a espécie, a interação entre os fatores climáticos, atividade macro e microbiológica do solo, qualidade e quantidade do resíduo vegetal (ROSOLEM *et al.*, 2003; ALCÂNTARA *et al.*, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2002; PARIZ *et al.*, 2011), além da localização e forma em que esses se encontram no tecido vegetal. Porém, para que uma espécie seja eficaz nessa ciclagem, deve haver sincronia entre o nutriente liberado pelo resíduo da planta de cobertura e a demanda da cultura de interesse comercial, cultivada em sucessão (BRAZ *et al.*, 2004).

As forrageiras tropicais, tais como as braquiárias, são conhecidas pela sua adaptação às condições de clima e solos tropicais e produzem matéria seca em abundância, durante todo o ano, se as condições de temperatura e umidade foram favoráveis. Além das brachiarias, o sorgo (*Sorghum bicolor*) apresentam elevada extração de nutrientes, principalmente K, P, Mg e S, demonstrando que a utilização de espécies vegetais, na forma de adubação verde, atua na ciclagem de nutrientes que se encontram, muitas vezes, indisponíveis às culturas anuais em razão da profundidade no solo.

Como elemento de cobertura, as plantas forrageiras, se destacam por apresentar ativo e contínuo crescimento radicular, alta capacidade de produção de biomassa, reciclagem de nutrientes e preservação do solo no que diz respeito à matéria orgânica, nutrientes, agregação, estrutura, permeabilidade, infiltração de água no solo e melhor movimentação e conservação de água no perfil, em função dos canais abertos pelas raízes decompostas (SALTON, 2000).

Apesar das perdas em razão da volatilização, lixiviação, percolação e escoamento por erosão laminar, estima-se que 60 a 70 % do N encontrado na biomassa vegetal heterotrófica sejam reciclados e novamente absorvidos pelas plantas no cultivo seguinte (Spain e Salinas, 1985). Portanto, a quantidade de N que retorna ao solo na forma de resíduos de plantas constitui considerável porção do N

total absorvido pelas plantas em sucessão, mesmo em culturas que não sejam fixadoras de N como a soja, comparada à pequena parte que é liberada pelas raízes e lavada das folhas pela chuva (COSTA *et al.*, 2012).

Em áreas de milho destinadas à ensilagem, com alta extração de nutrientes por causa da grande quantidade de material vegetal no processo, principalmente N e K, o consórcio evidenciou-se eficiente alternativa para promover a cobertura do solo para continuidade do SPD (CHIODEROLI *et al.*, 2012a), com efeitos positivos nas características físicas do solo e na produtividade da cultura da soja em sucessão (Chioderoli *et al.*, 2012b).

O K é o cátion mais abundante no citoplasma das células vegetais e não possui função estrutural, forma ligações com complexos orgânicos de fácil reversibilidade e, portanto, de fácil liberação dos restos vegetais, sendo rapidamente lixiviado logo após a ceifa das plantas de cobertura, com pequena dependência dos processos microbianos (GIACOMINI *et al.*, 2003), podendo-se considerar um aproveitamento do K, da palhada para o solo, de quase 100 % (SPAIN; SALINAS, 1985). Assim, após a dessecação dos capins, a concentração desse nutriente no tecido diminuiu drasticamente, pois é facilmente lavado pela água das chuvas, após o rompimento das membranas plasmáticas (CRUSCIOL *et al.*, 2008).

A eficiência da *Urochloa brizantha* cv. Marandu em reciclar K, elevando a forma trocável desse nutriente no solo variou entre 80 a 122 Kg ha⁻¹ de K, fato explicado pela capacidade das raízes dessa forrageira extraírem K em maiores profundidades, disponibilizando posteriormente o nutriente quando essas forem dessecadas para formação de palhada (MENDONÇA *et al.*, 2015).

Além de N e K, a quantidade potencial de P a ser liberada dos tecidos orgânicos, normalmente ligados estruturalmente a moléculas proteicas e em compostos ligados ao transporte de energia, pode tornar-se disponível tanto para absorção do sistema radicular da cultura em sucessão quanto para imobilização em compostos minerais de difícil solubilidade (MENDONÇA *et al.*, 2015). Aproximadamente 77% do P das folhas e 79% do P das raízes mortas ficam disponíveis durante o crescimento da cultura subsequente, após as plantas de cobertura.

Existem espécies de plantas de cobertura com capacidade de solubilização do P não-lábil, mediante a exsudação de suas raízes, a qual contém ácidos orgânicos, e estes, por sua vez, agem na dissolução do colóide, alimentando o P na

solução do solo. Com o aumento de matéria orgânica nos horizontes superficiais, em decorrência da deposição de palhada, há redução dos sítios de fixação do P, aos óxidos de Al e Fe, recobrando a superfície desses óxidos por moléculas de ácidos húmicos, acético e málico, ou pela formação de compostos na solução do solo. Assim, é observada uma tendência de menor fixação e, portanto, maior aproveitamento pela planta do P oriundo da adubação fosfatada (CORRÊA *et al.*, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização dos experimentos

Os experimentos foram realizados na área experimental Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, sob cobertura plástica do Departamento de Solos e Recursos Ambientais, no município de Botucatu/SP. A fase I deu-se de abril de 2014 à novembro de 2015, a qual contemplou o desenvolvimento dos Experimentos 1, 2 e 3. Em agosto de 2016 foi instalada a fase II, na qual foi repetido apenas o tratamento 3 da fase I.

3.1.1 Fase I

Na fase I foram desenvolvidos três experimentos com os corretivos de acidez do solo: 1 – calcário; 2 – escória de aciaria e 3 – calcário + escória de aciaria (C+E).

Foram utilizados dois Latossolos: Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) textura argilosa e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) textura média (Santos et al., 2006), ambos são solos ácidos e com baixos teores de P lábil, os quais foram coletados na profundidade de 0 a 0,20m, submetidos a análise química e granulométrica, conforme Tabela 1. Ambos os solos foram peneirados e colocados em vasos plásticos com capacidade para 20 litros de solo.

Tabela 1. Características químicas e granulometria dos solos utilizados no experimento analisados de 0 a 20 cm de profundidade.

Solos	Atributos químicos									Análise granulométrica				
	pH	M.O. CaCl ₂ g dm ⁻³	P resina mg dm ⁻³	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%	Areia	Argila	Silte	Textura
				-----mmol _c dm ⁻³ -----							-----g kg ⁻¹ -----			
LVdf*	4,0	14	5	63	0,5	13	2	15	78	19	467	443	90	Argilosa
LVd**	4,0	5	4	26	0,3	6	2	8	35	24	762	217	21	Média

LVdf* - Latossolo Vermelho distroférico; LVd** - Latossolo Vermelho distrófico.

3.1.1.1 Tratamentos

Inicialmente elevou-se a saturação por bases a 70% através dos tratamentos com calcário dolomítico (calcário), escória de aciaria (silicato) e calcário dolomítico + escória de aciaria (C+E) (Tabela 2) em ambos os solos. O solo já misturado aos corretivos foram umedecidos à capacidade máxima de retenção de água e cobertos com lona plástica, permanecendo em incubação por 30 dias.

Tabela 2. Caracterização química e física dos corretivos de acidez do solo.

Corretivos*	CaO	MgO	RE ⁽¹⁾	PNRT ⁽²⁾	PN	Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca
	-----%-----				%E	-----g Kg ⁻¹ -----			
					CaCO ₃				
EA	28,13	6,1	71	50	70	15	11	0,3	216
CD	27,75	16,4	75	67	88	16	3,5	0,2	275

*escória de aciaria (EA) e calcário dolomítico (CD). ⁽¹⁾RE = reatividade, expressa o percentual do corretivo que reage em três meses; ⁽²⁾PN = poder neutralizante, expressa o potencial químico do corretivo, em equivalente de CaCO₃. Fonte: Deus, 2014.

Após este período, os solos receberam os tratamentos referentes às fontes de fósforo: Superfosfato triplo (SFT), como fosfato de referência; Fosfato natural reativo (FR) e dois produtos provenientes de lagoas de rejeitos da própria produção de fertilizantes, denominados de fosfato precipitado 1 (FP1) e fosfato precipitado 2 (FP2) (Tabela 3), todas na dose de 300 mg dm⁻³ de P. Os demais nutrientes foram adicionados via solução nutritiva, conforme a recomendação proposta por Malavolta (1980).

Tabela 3. Características químicas das fontes fosfatadas utilizadas no experimento.

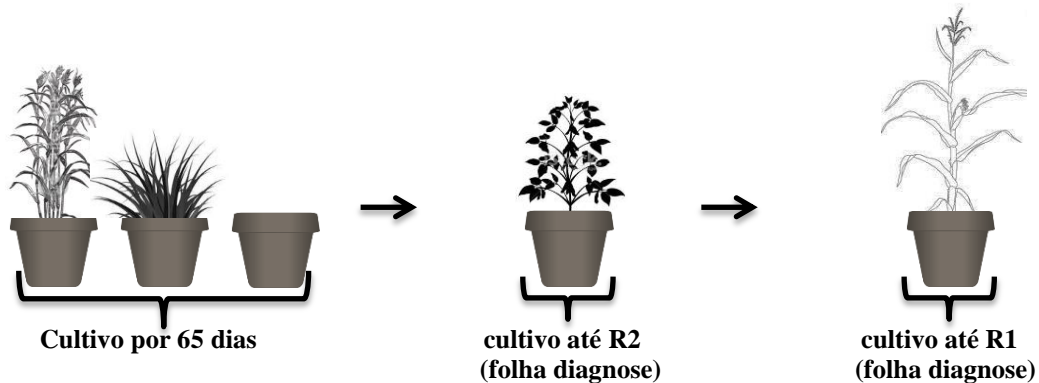
Fonte de P	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	P ₂ O ₅	K ₂ O	S-SO ₄	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	B
	T	AC	CNA	Ag									
%													
SFT	48,08	17,04	45,07	37,34	0,00	4,40	13,10	0,26	0,02	1,79	0,07	0,08	0,02
FR	29,40	6,87	5,77	0,00	0,04	2,36	32,60	0,33	0,02	0,39	0,00	0,06	0,09
FP1	9,10	2,62	3,53	0,00	0,00	3,60	24,76	0,23	0,00	1,05	0,03	0,05	0,08
FP2	14,40	5,97	11,68	0,00	0,00	2,50	15,00	0,34	0,01	3,29	0,08	0,08	0,02

T – Total; AC – Ácido Cítrico a 2% Rel-1:100; CNA - Citrato neutro de amônio+água; Ag – água. Fonte: Sandim (2016).

Após aproximadamente 30 dias após a aplicação das fontes de P foram semeadas os tipos de cobertura do solo. Nos tratamentos onde foi semeado o sorgo (*Sorghum bicolor*) utilizou-se 5 plantas por vaso, naqueles com braquiária (*Brachiaria decumbens*) foram usadas 6 plantas por vaso e, além disso, houve um tratamento sem planta de cobertura. Todos os vasos receberam os demais tratamentos igualmente. As plantas de coberturas foram semeadas em 09/07/2014 e efetuado o corte na pré-florescência, aproximadamente aos 65 dias após a semeadura (DAS).

Em 30/10/2014 foi semeada a cultura da soja (*Glicine max* L.), Dow 5G685, de ciclo semi-precoce / médio, deixando-se quatro plantas por vaso, sendo efetuado o corte das mesmas em R2. Após a cultura da soja, semeou-se a cultura do milho (*Zea mays* L.) em 12/01/2015, deixando-se três plantas por vaso e efetuando-se o corte das mesmas em R1, encerrando, assim a fase I (Figura 1).

Figura 1. Sequências de cultivos conforme estádios fenológicos das culturas.



3.1.2 Fase II

Na fase II, foram utilizados todos os vasos onde foi aplicado o corretivo C+E (experimento 3 da fase I). Nestes vasos, seguiram-se os mesmos tratamentos de cobertura vegetal (sorgo, braquiária e sem planta) e em seguida foram cultivados a soja e o milho. Iniciou-se com a semeadura das plantas de cobertura (sorgo e braquiária) em 15/08/2015 e seu corte na pré-florescência. Após, seguiu-se com a semeadura da cultura da soja em 20/11/2015 e corte em R2 e, semeadura do milho em 15/02/2016, e corte em R1. Nesta fase não foi reaplicado o corretivo nem as fontes de P, apenas feita a semeadura e condução das culturas, na mesma sequência da fase I, visando observar o efeito residual dos tratamentos.

3.2 Avaliações no solo

Após cada um dos cultivos foram feitas amostragens de solo com trado tipo sonda no sentido transversal do vaso, sendo coletadas três amostras simples que foram homogeneizadas para formar uma amostra de solo composta por vaso.

3.2.1 Análise química do solo

As amostras foram secas ao ar, peneiradas em peneira de malha de 2 mm, e encaminhadas para análise no Laboratório de Fertilidade do Solo do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da FCA/UNESP de Botucatu, onde determinaram-se os seguintes parâmetros: pH em CaCl_2 , matéria orgânica, Presina, K, Ca, Mg e S trocáveis, além dos teores de micronutrientes e, foram calculadas a capacidade de troca de cátion (CTC) e a saturação por bases (V%), conforme metodologia descrita por Raij *et al.* (2001).

3.2.2 Fracionamento sequencial químico do fósforo inorgânico do solo

As amostras já secas e peneiradas, foram pesadas (0,5g de TFSA) e submetidas a extração de P por extratores com diferentes forças de extração, segundo a metodologia de Chang & Jackson (1957) transcrita em Kuo (1996).

A primeira fração de fósforo extraída é o P-H₂O. Para tal, foram adicionadas 0,5g de solo (TFSA) em tubos tipo falcon de 50ml contendo 25 ml de NH₄Cl 1 mol L⁻¹, seguido de agitação durante 30 min em agitador horizontal. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 1.800 rpm, sendo o sobrenadante transferido para frasco plástico de 50 mL, que teve seu volume completado com água deionizada (extrato A). Neste determinou-se a concentração de P e calculou-se o teor de P-H₂O no solo.

Ao resíduo de solo no tubo de centrifugação foram adicionados 25 mL de NH₄F 0,5 mol L⁻¹ (pH 8,2), seguido de agitação por uma hora em agitador horizontal. Depois desse processo, a suspensão foi centrifugada por 5 min a 2.000 rpm, e o sobrenadante colocado em frasco plástico de 50 mL (extrato B). O resíduo de solo no tubo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado, centrifugado e as soluções de lavagens foram misturadas ao extrato B, onde foi determinada a concentração de P e calculado o teor de P-Al no solo.

O resíduo de solo do tubo de centrifugação foi submetido a adição de 25 mL da solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e agitação de 17 h. Após este período a suspensão foi deixada em repouso por 2 horas e, seguida, centrifugada por 5 min a 1800 rpm, o sobrenadante transferido para frasco plástico (extrato C), e o solo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado, e a seguir, centrifugado e misturado com o extrato C, no qual determinou-se a concentração de P no extrato e calculou-se o teor de P-Fe no solo.

Ao remanescente de solo no tubo de centrifugação foram adicionados 25 mL de H₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹, e seguiu-se de agitação por uma hora. A suspensão foi, então, centrifugada por 5 min a 1800 rpm e o sobrenadante transferido para frasco plástico, juntamente com as duas subseqüentes lavagens com 12,5 mL de NaCl saturado, após respectiva centrifugação. Na seqüência foi determinada a concentração de P no extrato e calculado o teor de P-Ca no solo.

A dosagem de P nos extratos foi feita por colorimetria. O Pi total calculado (Pi-total) foi obtido mediante a soma dos teores de P-H₂O, P-Al, P-Fe e P-Ca.

3.2.3 Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure)

Todas as amostras foram analisadas na borda da camada K do P, por espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES), na linha de análise SXS, no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais, situado em Campinas, SP, Brasil e, todos os padrões foram analisados no National Synchrotron Light Source (NSLS I), Brookhaven National Laboratory, situado em Upton, NY, Estados Unidos.

Para análise na linha de luz, as amostras de TFSA foram moídas em moinho de bola (MARCONI[®]) e armazenadas em sacos plásticos tipo ZIPLOC[®]. Para todas as amostras a contribuição das diferentes espécies de P em relação ao P total foi calculada por meio do ajuste de combinação linear (LCF – Linear Combination Fitting), na faixa de energia de -7 a 35 eV utilizando o software Athena[®] (RAVEL; NEWVILLE, 2005). As análises foram realizadas nos espectros após a fusão dos oito espectros coletados, correção da linha de base e normalização.

3.3 Análises nas plantas

As plantas de cobertura foram cultivadas até 65 DAS, quando foi realizado o corte. Todo o material foi pesado para a determinação da massa de matéria fresca, sendo que parte deste foi utilizada para a análise química do tecido vegetal e a outra parte devolvida ao respectivo vaso.

Já as culturas da soja e do milho foram conduzidas até os estádios fenológicos de R2 e R1, respectivamente, quando foram colhidas as folhas diagnose para a determinação da análise química do material. Da mesma forma, todo o material foi pesado fresco e uma parte destinada a obtenção da massa de matéria seca, o restante devolvido ao vaso.

3.3.1 Massa de matéria seca

As plantas foram cortadas a cerca de 2 cm do solo. O material foi acondicionado em sacos de papel e devidamente identificados. Todo o material foi pesado para obtenção da massa de matéria fresca, no entanto uma parte do mesmo foi destinado a determinação da massa de matéria seca, o qual foi submetido a

secagem em estufa com circulação de ar forçada acerca de 60–70 °C, até massa constante, o restante do material foi devolvido aos respectivos vasos.

3.3.2 Análise química

Todo material vegetal destinado à análise química foi acondicionado em saco de papel, devidamente identificado, seco em estufa com circulação de ar forçada acerca de 60–70 °C, até massa constante, triturado em moinho tipo Wiley, e submetidas à análise para determinação dos teores dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn), segundo os métodos descritos por Malavolta *et al.* (1997).

3.4 Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os tratamentos dispostos em esquema fatorial 3x3, constituídos de três fontes de fósforo e três coberturas vegetais, totalizando 216 unidades experimentais. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com auxílio do programa SISVAR (FERREIRA, 2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fase 1

4.1.1 Latossolo Vermelho distroférico e Latossolo Vermelho distrófico

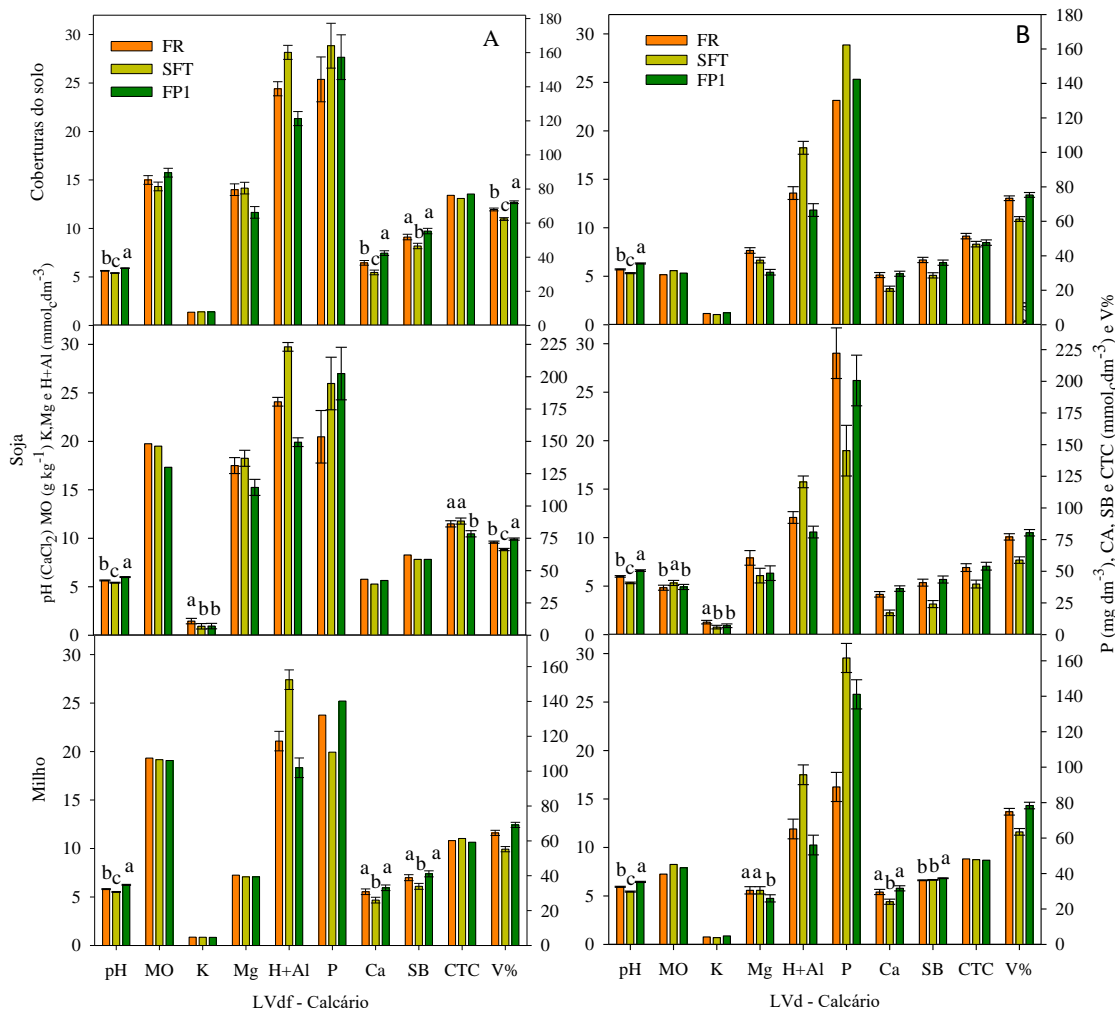
4.1.1.1 Análise química do solo

Analisou-se a diferença entre os corretivos aplicados e as fontes de P nos teores dos nutrientes: P, K, Ca, Mg, os valores de pH em CaCl_2 , H^+Al , CTC, V% e SB, para ambos os tipos de solos estudados, Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) textura argilosa e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) textura média, bem como as interações entre as fontes de P e as coberturas de solo utilizadas.

Tanto a escória quanto a composição desta com o calcário (C+E) foram efetivas na neutralização da acidez ativa do solo, comprovada pelo incremento nos valores de pH em ambos os solos (Figuras 2, 3 e 4). Segundo Korndörfer *et al.* (2004), a aplicação de silicatos de cálcio e magnésio (CaSiO_3 e MgSiO_3) promovem benefícios ao solo, como a elevação do pH e aumento do Ca e Mg trocável do solo, que indiretamente propicia o incremento na disponibilidade de P e podendo, ainda, atuar na redução da toxicidade de Fe, Mn e Al para as plantas (PRADO *et al.* 2002). Quanto às fontes de P, na presença do fosfato reativo (FR) e do fosfato precipitado 1 (FP1) observou-se incremento dos valores de pH.

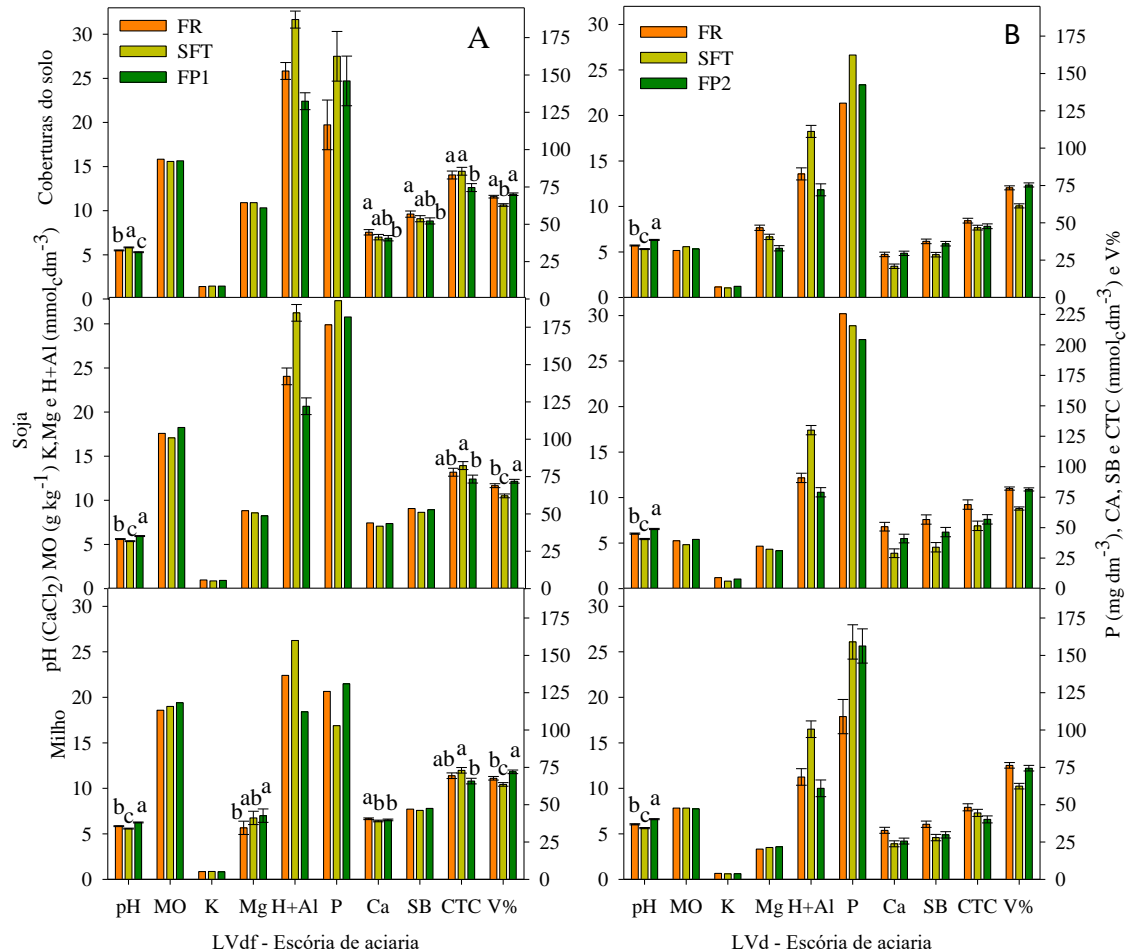
Embora não tenha sido observada influência das coberturas de solo nos valores de pH dos solos estudados, houve interação entre as coberturas e as fontes de P, em ambos os solos, nos quais, independentemente da cobertura de solo, os maiores valores de pH foram obtidos com a fonte FP1, no LVdf (Tabela 4). O pH também sofreu interação, na presença do calcário após o cultivo das coberturas no LVd (Tabela 5), onde da mesma forma que no LVdf, o FP2 propiciou maiores valores de pH. Já na composição C+E, apenas o sorgo e a ausência de planta apresentaram diferença significativa, onde os maiores valores de pH foram encontrados no solo adubado com FR e FP2 cultivado com sorgo e no SFT e FP2 sem cultivo prévio das coberturas.

Figura 2. Resultado da análise do solo nos tratamentos com o calcário e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP 1 e 2 - Fosfato precipitado).



Isto pode ser explicado pelo fato de que algumas coberturas possuem a capacidade de alterar o pH do solo, promovendo o abaixamento do pH rizosférico através da extrusão de próton de suas raízes, além de absorverem muito Ca, sendo essas as mais eficientes na utilização do P oriundo dos FN (NOVAIS; SMYTH, 1999). Assim como neste estudo.

Figura 3. Resultado da análise do solo nos tratamentos com a escória de aciaria e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, da cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP 1 e 2- Fosfato precipitado).

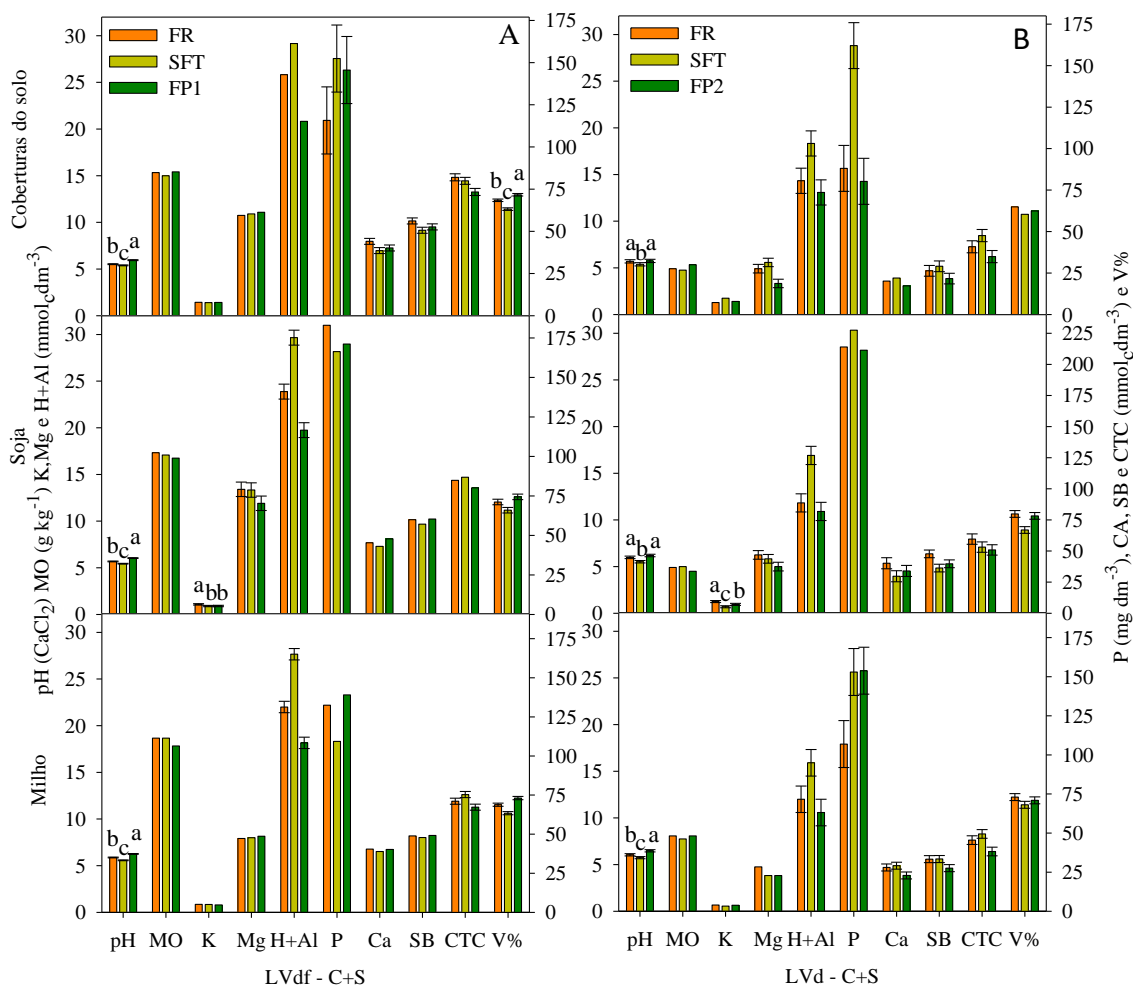


Observou-se que os valores da saturação por bases (V%), em ambos os solos, também foram menores frente ao uso do SFT. Sabe-se que há correlação positiva entre o aumento do V% e o pH do solo. Tal evidência já foi confirmada, na qual houve aumento do valor de pH conforme a saturação por bases aumentou, devido à maior dose de calcário dolomítico (SANDIM, 2016).

Como esperado, a V% (Figuras 2, 3 e 4), apresentou diferença significativa em todas as tratamentos, exceto após o cultivo das coberturas do solo no tratamento C+E. Para todos os corretivos aplicados, o comportamento das médias de V% foram maiores com as fontes FR e FP (1 e 2), inversamente aos valores de H+Al, nos quais o SFT prevaleceu sobre as outras duas fontes com as maiores médias. Como a saturação por bases (V%) representa a porcentagem de pontos de troca de

cátions, nos colóides, que estão ocupados por bases, Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , em relação aos pontos de troca dos cátions ácidos H^+ e Al^{3+} , é natural que seu valor seja aumentado uma vez que, além de ter os valores de pH elevados, a correção da acidez do solo foi realizada com corretivos com teores elevados teores de Ca. Além disso, as fontes FR e FP (1 e 2) também apresentam teores de Ca consideráveis, os quais podem ser disponibilizados após a solubilização destes materiais.

Figura 4. Resultados da análise do solo nos tratamentos com a composição calcário + escória de aciaria (C+E) e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP 1 e 2 - Fosfato precipitado).



Logo após o corte da cultura da soja, tanto no LVdf quanto no LVd, houve aumento de pH, independente do corretivo usado. A única exceção foi após as coberturas (Figura 3) sob o tratamento com escória, onde o valor de pH foi maior frente ao SFT, no entanto, para esta fonte, a V% manteve-se menor.

Os corretivos podem ter ação prolongada, mesmo depois de uma reação mais rápida (CASTRO, 2009). Este fato foi observado por ocasião da análise de solo após o milho no LVdf sob escória de aciaria e no LVd sob C+S, nos quais os valores de V% demonstraram incrementos em relação a análise realizada após a soja, nos mesmos parâmetros.

Tabela 4. Interações entre as fontes de P e as coberturas no solo LVdf.

Coberturas do Solo						
Fonte de P	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
	Escória			Soja/Calcário		
	pH			H+AL		
FR	5,4b*	5,6b	5,4b	24 b	22 b	25 b
SFT	5,3b	5,2c	5,2c	30 a	28 a	30 a
FP2	5,7a	5,8a	5,9a	19 c	20 c	20 c
DMS	0,17			1,56		
SB			Mg - Milho/Calcário+Escória			
FR	54	59 a	54 a	7 b	7	9 a
SFT	51	52 b	47 b	8 a	8	6 b
FP2	49	52 b	55 a	9 a	8	7 b
DMS	6,23			1,39		
K			Mg - Milho/Calcário			
FR	1,4	1,4b	1,4	7 b	9 a	7
SFT	1,4	1,5a	1,4	8 a	6 b	8
FP2	1,4	1,4ab	1,4	9 a	7 b	8
DMS	0,1			1,39		

*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste Tukey 0,05.

Os valores de V% sofreram interação das plantas e das fontes de P apenas no LVd (Tabela 5) após o cultivo das coberturas com escória. Por meio da braquiária e do sorgo, observou-se maiores valores de V% nas fontes menos solúveis FR e FP2, as quais não diferiram entre si, assim como na composição C+E, onde apenas a braquiária proporcionou diferença ($p < 0,05$) perante às mesmas fontes, que não demonstraram diferença entre si. Após a cultura do milho, também na composição C+E, a braquiária destacou-se com os maiores valores de V% com FP2 (79 %) o qual não diferiu do FR (73 %), no sorgo com o FR (70 %) o qual não apresentou diferença do SFT (68 %) e no sem planta com FR e FP2, os quais, também, não diferiram entre si (76 e 72 %).

A acidez potencial (H+Al) apresentou diferenças significativas em todos os corretivos e para as fontes de P (Figuras 2, 3 e 4). Quanto aos valores de H+Al observou-se que a fonte SFT proporcionou os maiores valores, enquanto FR e FP (1 e 2) os menores. Este comportamento foi observado em todas as coletas e para todos os tratamentos com corretivos de acidez do solo.

Tabela 5. Interações entre as fontes de P e as coberturas no solo LVd.

Coberturas do Solo						
Calcário						
Fonte de P	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
	pH			H+Al		
FR	5,7b	5,7b	5,7b	13 b	13 b	13 ab
SFT	5,1c	5,3c	5,4c	20 a	18 a	15 a
FP2	6,2a	6,3a	6,4a	12 b	11 b	11 b
DMS	0,19			2,28		
Escória						
Fonte de P	V%			Ca		
	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
FR	70 ab	71 a	70	27	27 a	29 a
SFT	65 b	53 b	63	28	16 b	28 ab
FP2	75 a	64 a	71	30	14 b	22 b
DMS	7,61			6,32		
Fonte de P	CTC			SB		
	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
FR	47	49 ab	46 a	33	34	33 a
SFT	53	53 a	41 a	34	34	22 b
FP2	50	42 b	30 b	37	30	19 b
DMS	7,88			7,54		
C+E						
Fonte de P	pH			H+Al		
	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
FR	5,8	5,9a	5,3b	13 b	11 b	18 a
SFT	5,3	5,2b	5,5ab	18 a	19 a	17 a
FP2	5,3	5,9a	6,0a	14 ab	13 b	12 b
DMS	0,62			4,68		
Fonte de P	V%			Mg		
	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
FR	67 a	66	60	6 b	4 a	4 a
SFT	54 b	57	68	3 a	6 b	6 b
FP2	60 ab	63	64	2 a	3 a	3 a
DMS	10,17			1,59		
Milho						
C+E						
Fonte de P	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
	V%			Ca		
FR	73 ab	70 a	76 a	28	24 b	31 b
SFT	68 b	68 ab	68 b	29	28 b	29 b
FP2	79 a	61 b	72 ab	32	15 a	21 a
DMS	7,71			7,69		
Fonte de P	SB			P - Escória		
	Braquiária	Sorgo	Sem planta	Braquiária	Sorgo	Sem planta
FR	32	29 b	37 b	86 c	85 b	94 b
SFT	33	33 b	33 ab	192 a	132 a	156 a
FP2	36	20 a	26 a	128 b	159 a	135 a
DMS	7,76			28,42		

*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo Teste Tukey 0,05.

Prado et al. (2002), obtiveram resultados onde a acidez potencial (H+Al) foi reduzida acentuadamente pela aplicação dos calcários e, em menor proporção, quando se aplicou a escória de siderurgia. Na análise após as coberturas, o calcário foi o tratamento que propiciou os menores valores de H+Al frente aos outros corretivos, já após a soja, a composição C+E mostrou-se mais eficiente do que o calcário e a escória isolados para todas as fontes usadas. Após a cultura do milho

não é possível observar o mesmo comportamento. No solo LVd, o comportamento dos valores de H+Al, embora tenham demonstrado diferença significativa entre as fontes, variaram menos que no LVdf, mantendo o SFT com os maiores valores.

Considerando que o valor inicial de H+Al era de 63 e 26 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$, nos solos LVdf e LVd, respectivamente, pode-se afirmar que todos os tratamentos com os corretivos, independente da fonte de P, proporcionaram diminuição dos valores de H+Al iniciais, consideravelmente, já na primeira avaliação (após as coberturas do solo) na ordem de 60% no LVdf e de 44% no LVd.

O uso da escória de siderurgia proporciona o aumento de índice de pH, Ca^{2+} e Mg^{2+} , e conseqüentemente a soma de bases e o V%, redução da concentração de H+Al (PRADO; NATALE, 2004). A redução da acidez potencial do solo se deve a neutralização exercida pela fonte silicatada, que promove a reação de ânions SiO_3^{-2} com prótons de hidrogênio (ALCARDE, 1992; CARVALHO-PUPATTO *et al.*, 2004).

Frente às coberturas (Tabela 6) observou-se que após a soja sob calcário, a presença de plantas (sorgo ou braquiária) ($p>0,05$) não diferiu entre si pelos maiores valores de H+Al no LVdf. O mesmo comportamento foi observado no LVd (Tabela BB) no solo após o cultivo das coberturas e da soja.

Tabela 6. Efeito das coberturas do solo (CS): sorgo (S), braquiária (B) e ausência de planta (SP) nos teores dos nutrientes, matéria orgânica (g Kg^{-1}) (MO), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB) e CTC ($\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$), nos tratamentos com calcário (calc) e escória (esc) no Latossolo Vermelho distroférrico.

	Coberturas do Solo		Soja	Milho				
	Calc	Esc	Calc	Calc				Esc
CS	Mg	K	H+Al	MO	Ca	SB	CTC	Mg
S	12 b*	1,4a	25 a	20 a	30 ab	38 ab	61 a	5 b
B	12 b	1,4b	24 ab	18 ab	28 b	35 b	60 b	6 ab
SP	14 a	1,4ab	24 b	18 b	32 a	40 a	62 a	7 a
DMS	1,2	0,05	0,9	1,78	3,25	3,44	3,79	1,13

* médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey 0,05 de probabilidade.

No LVdf (Tabela 6), as coberturas influenciaram os teores de Mg e K, de forma que o solo após o cultivo do sorgo sob escória apresentou o maior teor de K, enquanto o solo com a braquiária apresentou o menor teor. Tanto a braquiária quanto o sorgo apresentam-se como acumuladoras de K obtendo 96,4 e 84,4 kg ha^{-1} de K acumulado aos 42 dias após o manejo, com taxas de decomposição de 40,8 % e 62,6%, e tempo de meia vida de 56 e 117 dias, respectivamente, para o mesmo período (TORRES; PEREIRA, 2008). Já para o Mg, a ausência de cobertura

proporcionou o maior teor deste nutriente ($14,5 \text{ g kg}^{-1}$), evidenciando assim, o aproveitamento deste nutriente pelas coberturas usadas.

A acidez potencial (H+Al) apresentou interação com as coberturas e as fontes de P ($p < 0,05$) no LVdf sob calcário (Tabela 4), onde o SFT interagiu com todos os tratamentos com plantas de cobertura e sem planta, proporcionando os maiores valores. Já no LVd (Tabela 5), as interações foram observadas frente a calcário, da mesma forma que no LVdf e na composição C+E, onde os maiores valores foram encontrados com o cultivo prévio da braquiária adubada com SFT e FP 2 (18 e $14 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente), com o cultivo do sorgo e SFT ($19 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e sem cultivo de plantas e FR e SFT (18 e $17 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente).

Os teores de Ca e os valores de SB demonstraram diferença significativa ($p < 0,05$) para as fontes de P perante os corretivos no LVdf e no LVd (Figura 2, 3 e 4), exceto frente ao C+E neste solo. O comportamento do Ca e SB seguiu de forma semelhante durante todo o experimento.

Sob calcário, o solo com as coberturas e o milho ($p < 0,05$) proporcionaram os maiores teores de Ca na presença da fonte FP1 (LVdf) e FP2 (LVd), a qual não diferiu do FR. Já no solo LVdf após a soja, frente ao corretivo citado, não apresentou diferença ($p > 0,05$) no Ca e SB, independentemente das fontes de P, no entanto, no LVd ($p < 0,05$) o maior teor de Ca foi encontrado no FP2 ($36 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), assim como a SB ($43 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), a qual não diferiu do FR ($41 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Independente do corretivo, as fontes citadas apresentam teores de Ca consideráveis, capazes de promover diferenças nos teores do nutriente no solo, entre os corretivos utilizados.

O uso da escória de aciaria como corretivo, diferentemente do calcário, proporcionou os maiores teores de Ca e valores de SB, após as coberturas, frente à fonte FR, 44 e $57 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no LVdf e, 28 e $34 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no LVd, respectivamente. Assim, também foi observado no LVd após a cultura da soja com 50 e $56 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, para Ca e SB, respectivamente. Após o milho no LVdf não houve diferença ($p > 0,05$), porém, no LVd ($p < 0,05$) a mesma tendência foi observada, onde o FR promoveu os maiores teores e valores de Ca e SB (33 e $37 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

É evidente o efeito da correção da acidez do solo no aumento dos valores de pH e de saturação por bases, diminuição de H+Al, e também, incremento nos teores de cálcio e magnésio. Então, além do incremento nos teores dos cátions básicos pelos corretivos, as fontes de P, como FR, quando solubilizadas terminam por

disponibilizar alguns desses cátions. Os FR são concentrados apatíticos ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$), dos quais os fosfatos de Ca constituem os mais importantes economicamente, assim como o FR utilizado neste estudo, o qual contém 32,6% de Ca em sua composição (Tabela 3).

A composição do calcário + escória de aciaria (C+E) no solo após as coberturas colaborou com os maiores teores de Ca frente à fonte FR (LVdf) e, na SB não houve diferença entre o FR e o SFT, em ambos os solos.

Tanto a análise do solo após a soja quanto após o milho no LVdf não demonstraram diferença estatística ($p > 0,05$) frente às fontes em relação aos teores de Ca e SB. Já, no LVd, após a soja, a composição C+E influenciou os teores de Ca e SB perante as fontes FR e FP2, as quais não diferiram entre si. No entanto, após a cultura do milho, para as mesmas variáveis, o SFT influenciou os maiores teores, não diferindo do FR.

Os teores de Ca sofreram influência da interação entre as variáveis estudadas apenas no LVd (Tabela 5), nos tratamento com escória após as coberturas e com C+E após o milho ($p < 0,05$). Em ambos os corretivos, a braquiária não apresentou diferença significativa. Após as coberturas do solo com escória, o sorgo com FR obteve o maior teor de Ca ($27 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$), assim como o tratamento ausência de planta ($29 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$), o qual não foi diferente do SFT ($28 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$). Após o milho, na composição C+E, o FR também apresenta o maior teor do nutriente o qual não diferiu do SFT ($24 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$ e $28 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$, respectivamente), da mesma forma aconteceu com a ausência de planta (31 e $29 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$). FR é a fonte de P utilizada com maior teor de Ca (32,6 %).

O K é o nutriente mais solúvel nos extratos vegetais, no entanto, não foram observadas diferenças entre as coberturas do solo quanto a este nutriente. Possivelmente isto se deve ao fato de que independente da espécie envolvida, ocorre a rápida liberação devido ao nutriente não participar a nenhuma estrutura orgânica nas plantas (TAIZ; ZEIGER, 1991). Inclusive chegando a um aproveitamento de 100% proveniente dos restos culturais (SPAIN; SALINAS, 1985), porém perdas em solos arenosos podem ocorrer por lixiviação.

Giacomini *et al.* (2003) observaram rápida liberação de K do tecido vegetal de aveia, ervilhaca e nabo forrageiro, com taxa de liberação deste nutriente em torno de 4,5 vezes maior do que a do P. TORRES e PEREIRA (2008), constataram a superioridade da braquiária em relação ao sorgo 42 dias após o manejo na liberação

de K. Este período tem sido relacionado às maiores perdas de K (45 dias), sendo dentre os nutrientes o de maior liberação acumulada (CALONEGO *et al.*, 2012).

Os teores de Mg no solo demonstraram diferença perante as fontes de P e os corretivos ($p < 0,05$) no LVdf com calcário após as coberturas e a soja, nas quais os maiores teores foram observados com FR e SFT, os quais não diferiram entre si, e com escória após o milho, com os maiores teores no FP1 que não diferiu do SFT. No LVd, os teores de Mg com calcário após as coberturas, soja e milho ($7 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$, 8 e $5 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$) com a fonte FR. E, também, com a composição C+E, após as coberturas o SFT proporcionou o maior teor ($5 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$), o qual não foi diferente do FR ($5 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$). Após a soja, o FR propiciou o maior teor ($6 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$) não diferindo do SFT ($6 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$) e, após o milho o FR com o maior teor ($4 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$).

As coberturas do solo e as fontes interagiram nos resultados do teor de Mg no solo LVdf após o milho com calcário e C+E. No primeiro, o uso das coberturas proporcionou resultados diferentes, onde a braquiária com FP1 demonstrou o maior teor de Mg no solo, não diferindo do SFT, enquanto o sorgo apresentou maior teor com o FR. Sob a composição C+E, a braquiária manteve o mesmo comportamento, no entanto, houve diferença frente ao tratamento ausência de planta, no qual o FR foi superior às demais fontes.

Segundo Marschner (1995), 70% do Mg atua no vacúolo, sendo rapidamente liberada, uma vez que esta porção não faz parte de constituintes celulares, e o restante do Mg (30%) é liberado posteriormente de forma gradual, pois faz parte de compostos estruturais das plantas. Calonego *et al.* (2012), ao estudar a persistência e liberação de nutrientes pela palha do milho, braquiária e labe-labe, constataram que o labe-labe e o milho disponibilizaram mais Mg para o solo em todas as épocas de avaliação, com liberação acumulada ao final de 135 dias de, aproximadamente, 38% e 31%, respectivamente, enquanto a braquiária libera apenas 19% de perda acumulada de Mg da palha de braquiária. No entanto, os autores comentam que tanto o milho como o labe-labe apresentaram máxima perda de Mg nos primeiros 45 dias de avaliação. Já a braquiária apresentou liberação crescente até a última avaliação, ou seja, até 135 dias.

Analisando os dados de MO (Figuras 2, 3 e 4), somente foi observada diferença ($p < 0,05$) nos teores de MO no LVdf quanto as fontes sob o calcário após as coberturas do solo (Figura 2), destacando-se FR e FP1 com os maiores teores.

De maneira geral, os teores de MO aumentaram no decorrer do experimento. Considerando que os teores de MO originais no LVdf e no LVd eram de 14 e 5 g dm^{-3} , os tratamentos e o cultivo das coberturas do solo permitiram um incremento médio de 5 e 4 g dm^{-3} de MO nestes solos, respectivamente.

Os valores da CTC, em ambos os solos aumentaram durante as duas primeiras coletas, ou seja, após as coberturas e após a soja, diminuindo após a cultura do milho, mesmo assim o LVd ainda manteve um valor de CTC acima do original (35 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$).

Após o cultivo das coberturas do solo, as fontes SFT e FR permitiram os maiores valores de CTC (Figuras 2, 3 e 4), não diferindo entre si em muitos casos. O tratamento com calcário não proporcionou diferença significativa após as coberturas e o milho no LVdf, assim como após as coberturas no LVd, e, após a soja no C+S do LVdf. A interação entre as coberturas e as fontes na CTC apenas foi observada no LVd (Tabela 5), após o cultivo das mesmas sob escória, onde para a braquiária não houve diferença ($p>0,05$), já para o sorgo e o tratamento sem planta ($p<0,05$), as fontes FR e SFT não foram diferentes entre si ao proporcionar os maiores valores de CTC.

Valores de CTC no LVdf (Figura 1) após as coberturas do solo com escória de aciaria (média de 80 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) e após as duas outras culturas (soja e milho) na composição C+E (83 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$) sobressaíram-se aos demais tratamentos. No LVd, após as coberturas e o milho, o tratamento com calcário propiciou as maiores médias (48 e 47 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$), já após a soja, o C+E proporcionou valores médios de 54 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$.

Em solos tropicais, a matéria orgânica desempenha importante papel na disponibilidade de nutrientes, pois a maior parte da CTC destes solos é devido aos colóides orgânicos, principalmente porque são solos com cargas variáveis ou dependentes de pH (SPARKS, 2003), e representam mais de 70% da carga total em amostras da superfície de Latossolos (WEBER *et al*, 2005). Com a variação do pH do solo, ocorre dissociação e protonação dos grupos funcionais presentes na superfície como o carboxil, fenólicos e aminas, provenientes da matéria orgânica e o hidroxil advindo dos óxidos de alumínio, de ferro e dos argilominerais, podendo ser tanto positivas como negativas, uma vez que, ao se elevar o pH esses grupos se desligaram do mineral liberando íons H^+ e formando uma carga negativa no mineral (SANTOS, 2007).

Os teores de P no solo (Figuras 2, 3 e 4) apresentaram comportamento semelhante frente aos tratamentos com os corretivos e as fontes de P após o cultivo das coberturas nos dois solos estudados. Independentemente do corretivo utilizado, as fontes SFT e FP (1 e 2) proporcionaram os maiores teores de P, não diferindo entre si, em relação ao FR. Após a cultura da soja foi verificada diferença significativa ($p < 0,05$) com o calcário em ambos os solos, nos quais o SFT e o FP1, no LVdf, propiciaram os maiores teores de P no solo, e FR e FP2 no LVd. No LVdf, após o milho não houve diferença entre os corretivos e as fontes de P. Já no LVd o SFT proporcionou os maiores teores em todos os corretivos, não diferindo do FP2 com a escória e C+E.

Tal fato poder ser decorrente do efeito sequencial dos experimentos, uma vez que o manejo do solo, as remoções de P pelas culturas, as aplicações de fertilizantes fosfatados, a calagem e adição de matéria orgânica alteram bastante a dinâmica das transformações do P no solo (TIESSSEN, 1992).

Após as coberturas no LVdf, observa-se a importância da fonte SFT na colaboração do incremento rápido de P no solo, seguida pelo FP1. Tal comportamento era esperado pelo fato de o solo original ser ácido e ter sido corrigido, alcançando a saturação por bases desejada, além do SFT ser uma fonte de P solúvel e de rápida disponibilidade para a solução do solo. A partir do teor inicial do P no LVdf (5 mg dm^{-3}) e do LVd (4 mg dm^{-3}), os tratamentos com corretivos de acidez do solo e as fontes de P, proporcionaram teores de P maiores que 80 mg dm^{-3} , considerado teor alto, em todos os cultivos.

A elevação do pH do solo através da calagem, promove a precipitação de Fe e de Al trocáveis pela produção de hidroxilas, reduzindo a precipitação de P com esses dois metais (CAIRES; ROSOLEN, 1998). De forma muito semelhante ao calcário, inclusive com maior solubilidade, os silicatos, como as escórias promovem a neutralização do H^+ e do Al^{3+} fitotóxico, diminuindo a acidez potencial (LÉLES *et al.*, 2010). No entanto, a retenção de P pelo solo mantém-se em valores estequiométricos semelhantes quando se substitui a precipitação do P pelo Al^{3+} do solo ácido pela sua adsorção pelo hidróxido de Al recém-formado pela calagem (HAYNES, 1984).

A elevação do pH promove, também, a desprotonação de hidroxilas de radicais orgânicos e daquelas expostas na superfície das argilas, aumentando a repulsão (menor adsorção) entre o fosfato e a superfície adsorvente e diminuindo o

potencial eletrostático. Por outro lado, com o aumento do pH, ocorre diminuição da forma H_2PO_4^- , em relação a HPO_4^{2-} , esta (bivalente) preferencialmente adsorvida, contrabalançando o decréscimo do potencial eletrostático (NOVAIS; SMYTH, 1999). Também, segundo esses autores, com elevada dose de calcário e maior teor de Ca trocável, pode ocorrer a precipitação de P, formando fosfatos bi e tricálcicos de baixa solubilidade.

Além da contribuição da correção da acidez do solo na redução da adsorção de P, a capacidade de adsorção de P diminui com o aumento da concentração deste elemento no solo (WHALEN; CHANG, 2002). Desta forma, percebe-se que todas as fontes utilizadas no estudo contribuíram para o incremento nos teores de P dos solos de forma efetiva.

Na Tabela 5 observa-se a interação das fontes de P e as plantas utilizadas com o propósito de auxiliar na biodisponibilização do P. Todas as plantas juntamente com a fonte SFT proporcionaram os maiores teores de P no solo, sendo a braquiária com a maior média entre as plantas.

Considerando o SFT a fonte de referência, o FP2 não diferiu da mesma em nenhum dos tratamentos com plantas de cobertura e sem planta, perante a escória de aciaria. Vale ressaltar que os resultados da Tabela 5 foram obtidos após o cultivo da soja e do milho, então, mesmo no tratamento ausência de planta, restos culturais da soja formaram a palha que recebeu a cultura do milho.

A capacidade de adsorção dos colóides do solo podem diminuir na presença dos ácidos orgânicos liberados pela palha em superfície (FRANCHINI *et al.*, 2001). Neste estudo foi observada a influência das coberturas nos teores de P ($p < 0,05$) apenas no LVd (Tabela 7) sob a escória de aciaria após a cultura da soja, na qual o solo apresentou o maior teor de P sob a palhada da braquiária (232 mg Kg^{-1}), não diferindo do sorgo (212 mg Kg^{-1}).

Tabela 7. Efeito das coberturas do solo (CS): sorgo (S), braquiária (B) e ausência de planta (SP) nos teores dos nutrientes, matéria orgânica (g kg^{-1}) (MO), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB) e CTC ($\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$), nos tratamentos com calcário (calc) e escória (esc) no Latossolo Vermelho distrófico.

Coberturas do solo							
CS	Calcário			Escória			
	H+Al	Mg	V%	Ca	SB	CTC	V%
S	14 ab	6 b	69 b	26 a	33a	48 a	68 a
B	15 a	5 b	68 b	28 a	35 a	50 a	70 a
SP	13 b	7 a	72 a	19 b	25 b	39 b	62 b
DMS	1,32	0,58	2,75	3,65	4,35	4,55	4,39

Soja							
	Calcário			Escória			C+E
	H+Al	SB	CTC	P	Mg	V%	K
S	13 ab	39 a	52 a	212 ab	35 b	74 b	1,1a
B	12 b	33 b	45 b	232 a	41 ab	77 a	1,0a
SP	13 a	36 ab	49 ab	201 b	43 a	77 a	0,8b
DMS	1,21	5,53	6,18	22,94	7,1	2,61	0,22

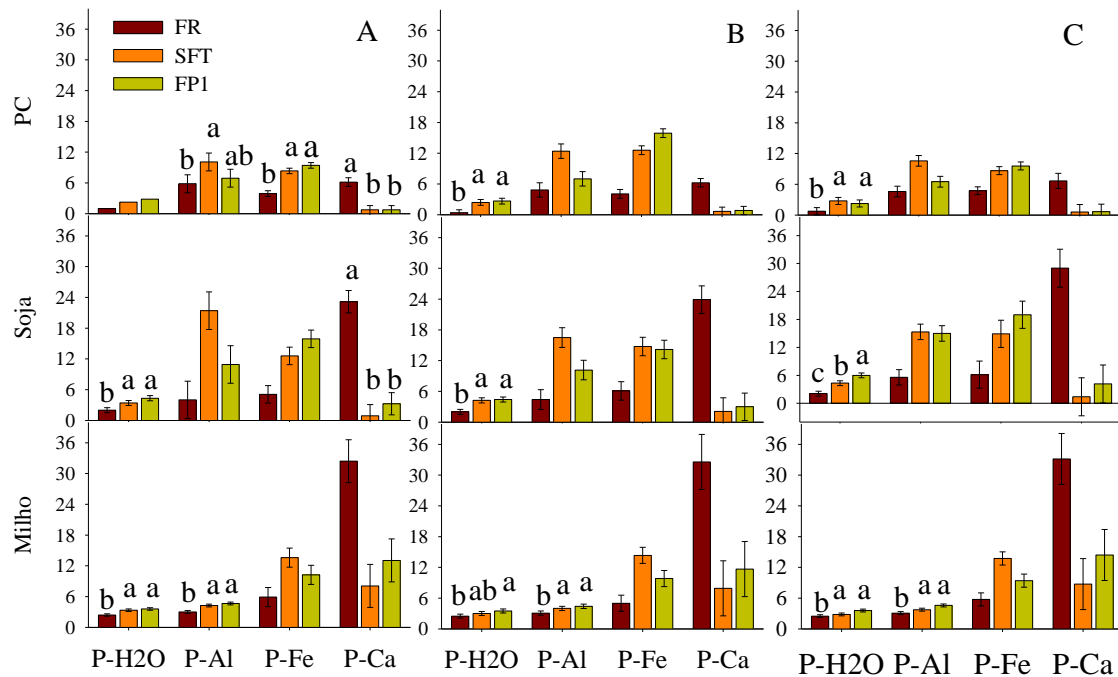
Milho							
	C+E			Escória			
	Ca	SB	V%	Ca	SB	CTC	V%
S	23 b	27 b	66 b	24 b	28 b	42 b	67 b
B	29 a	34 a	73 a	26 b	31 ab	43 ab	71 ab
SP	27 ab	32 a	72 a	30 a	35 a	47 a	74 a
DMS	4,44	4,48	4,45	3,99	4,25	4,72	3,75

* médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey 0,05 de probabilidade.

4.1.1.2 Fracionamento químico do P inorgânico

Na Figura 5, observa-se o fracionamento do P inorgânico (Pi) do Latossolo Vermelho distroférico durante a primeira fase (ou primeiro ano) do experimento. O método utilizado para o fracionamento do Pi consiste em fracionar o Pi em P solúvel em água (P-H₂O), P ligado a alumínio (P-Al), P ligado a cálcio (P-Ca) e P ocluso. Como o P-occluso possui grande estabilidade em partículas de óxidos de Fe e Al, o mesmo não contribui em curto prazo para o fornecimento de P para as culturas, sendo sua extração mais difícil perante as outras formas de P, portanto, não tem sido determinado em diversos trabalhos (NOVAIS; SMITH; NUNES, 2007). Assim, para o fracionamento inorgânico do P do solo, são determinadas as formas P-H₂O, P-Al, P-Fe e P-Ca.

Figura 5. Fracionamento químico do P inorgânico ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$) no solo LVdf após o cultivo das coberturas (CS), soja e milho, de acordo com os corretivos calcário (A), escória de aciaria (B) e calcário + escória de aciaria (C).



Observa-se que com a fonte FR no LVdf (Figura 5) os menores teores de P-H₂O foram observados, enquanto que as fontes FP1 e SFT demonstraram maior capacidade de fornecimento de P para esta fração. Outros trabalhos (RANNO *et al.*, 2007; SOUZA *et al.*, 2007) também verificaram que os teores de Pi-H₂O nos solos são baixos, o que revela a forte interação do P com a fase sólida do solo. Esta fração representa o P inorgânico lábil, prontamente disponível às plantas, integrando a solução do solo (TIESSEN; MOIR, 2007), portanto não se deve comparar esta fração às demais ligadas ao Fe, Al e Ca, uma vez que estas passam a P-H₂O antes de serem absorvidas pelas plantas.

As frações P-Al e P-Fe (Figura 5) demonstraram ser o maior compartimento de Pi do solo LVdf pelo menos até a implantação da cultura do milho. A fonte SFT proporcionou os maiores teores de P-Al após o cultivo das coberturas e da soja, independente do corretivo de acidez do solo utilizado. Enquanto que após o cultivo do milho os teores de P desta fração diminuíram em relação às coletas anteriores. Estudos comprovaram que os ácidos orgânicos citrato e o malato, foram exsudados por linhagens de milho quando expostas ao Al (ALVES *et al.*, 2000). Os ácidos orgânicos possuem função importantíssima que está relacionada com a fitodisponibilização do fósforo, uma vez que estes compostos são capazes de

dissociar os complexos P-Al e P-Fe, formando compostos estáveis com o Al e Fe e liberando o P para a solução do solo (SPOSITO, 1989).

Dentre os ácidos orgânicos mais ativos para tal quelatização e, portanto, à disponibilização de P, estão: cítrico, oxálico, glucônico, láctico e málico (TEIXEIRA, 2015). O ácido cítrico e ácido málico são considerados ácidos orgânicos de alta atividade de complexação e competição no solo, pois apresentam maior número de grupos funcionais ativos, portanto, maior efetividade (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Existem algumas preferências de complexação entre compostos orgânicos e íons do solo. O Al é, preferencialmente, complexado com o ácido cítrico, já o ácido málico, liga-se preferencialmente com o Ca (TECHIO, 2009).

Analisando especificamente a fração P-Al no solo tratado com calcário (Figura 5), observa-se que a fonte SFT proporcionou a maior parte do conteúdo de P desta fração, no entanto, independente da fonte de P usada, houve decréscimo do P-Al após o cultivo do milho. O mesmo comportamento foi observado para a escória de aciaria e a composição C+E. Isto pode ser explicado pela acidificação dos solos, a qual deve-se à substituição de cátions trocáveis por íons H^+ e Al^{3+} no complexo de troca, absorção de cátions básicos pelas plantas e, também, pelo uso de fertilizantes de caráter ácido. O Al em concentração elevada, além de ser tóxico às plantas, pode interferir na disponibilidade de outros nutrientes, principalmente na solubilidade do fosfato no solo, que tende a reagir com o Al solúvel, formando fosfatos de Al de baixa solubilidade em solos ácidos (VIVIANI *et al.*, 2010). Existem evidências de que a disponibilidade de P em solos ácidos altamente intemperizados é governada, principalmente, pelo fosfato ligado a alumínio, que aparentemente é a forma mais lábil de P no solo (NOVAIS; SMYTH, 1999), comparando-se às demais formas no solo.

Da mesma forma que o P-Al, o P-Fe (Figura 5) também mostrou teores elevados após as coberturas do solo e da soja, diminuindo após o cultivo do milho. No entanto a fonte FP1 proporcionou os maiores teores. Após a soja, os teores de P-Fe tiveram um pequeno incremento em relação ao cultivo anterior, mantendo-se os teores após o milho.

No entanto, se pode observar que, por ocasião do cultivo do milho, ou seja, na última coleta, os teores de P-Fe permaneceram menos alterados comparados aos teores de P-Al (Figura 5). Gonçalves *et al.* (1989), observaram aumento inicial nos teores de P-Al em relação ao P-Fe, em estudo sobre a cinética de

transformação de P-lábil em não-lábil em solos de Cerrado. No entanto, com o aumento do tempo de incubação do P, essa situação foi revertida, do P não-lábil em lábil, dada a maior estabilidade da ligação do P-Fe, mesmo esta sendo muito pequena (CAMPELO *et al.*, 1994).

Os teores do P-Ca (Figura 5), apresentam-se bem definidos com os maiores teores desta fração na presença de FR, os quais se apresentam com teores médios de 6,16, 23,14 e 32,41 mg dm⁻³, nas coletas após as coberturas, soja e milho, respectivamente, para esta fonte no tratamento com calcário, 6,25 23,91 e 32,58 com escória e, 6,0, 29 e 33 com C+E, em comparação as outras fontes. Com o passar do tempo, parte do P foi armazenado na forma de P-Ca, enquanto as outras frações sofreram solubilização liberando P para as culturas. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que o FR possui 32,6% de Ca, maior quantidade de Ca perante as outras fontes utilizadas (Tabela 3). O excesso de cálcio, fornecido pelo uso do calcário, associado à presença de cálcio nas fontes, formando fosfato bicálcico, pode tornar o P indisponível às plantas (HERNANDEZ; SILVEIRA, 1998).

O Ca e o P liberados dos fertilizantes fosfatados para a solução do solo são, em grande parte, absorvidos pela planta e adsorvidos pelo próprio solo. Portanto, o solo e a planta funcionam como drenos para Ca e P. Solos ácidos, pobres em bases e em P, com predominância de cargas positivas (liberação alta de prótons – H⁺), com CTC elevada (grande “dreno” de Ca) e, ao mesmo tempo, com baixo poder tampão de P, oferecem melhores condições para que o uso dos FN seja mais eficiente (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A Tabela 8 traz as médias dos teores de Pi obtidos pelo fracionamento do P do LVdf na primeira fase do experimento. Observa-se que a única interação significativa deu-se após soja, no tratamento com calcário, na qual o tratamento ausência de planta obteve os maiores teores de P-Fe (13 mg dm⁻³), não diferindo do sorgo (12 mg dm⁻³), enquanto o solo com braquiária proporcionou o menor teor. Embora não tenha sido observada interação entre o SPD e convencional com os níveis de Fe relativo à totalidade dos óxidos de Fe pedogênicos (cristalinos e de baixa cristalinidade) e aos óxidos de Fe de baixa cristalinidade (principalmente ferrihidrita), bem como sua relação com os teores de C orgânico (SILVA NETO *et al.*, 2008).

Neste estudo, o uso de plantas de cobertura do solo como as braquiárias, contrariou esta informação, uma vez que o uso dessas plantas, as quais possuem a

habilidade de adaptação aos solos com baixa fertilidade, absorvendo P mesmo em baixa disponibilidade, através de recursos como a produção de fosfatase ácida na rizosfera (JANEGITZ *et al.*, 2013) podem ser consideradas cicladoras de Fe, apresentaram na análise foliar quantidade de Fe de 300 a 420 mg kg⁻¹. Solos cultivados com braquiária possuem menores teores de P nas frações pouco lábeis e maiores nas frações mais lábeis (SILVA *et al.*, 2003).

No LVdf (Tabela 8) foi observado, após o cultivo das coberturas, que a fração P-Fe corresponde ao maior compartimento de P deste solo, independente do corretivo utilizado. Após a soja, os teores de P desta fração teve ligeiro aumento. Porém, após o milho, o P-Al diminuiu em relação à coleta anterior e as frações P-Fe e P-Ca passaram a compor do maior compartimento de P, havendo evidências de participação das frações consideradas menos lábeis no suprimento de P para o milho em função da diminuição das mesmas (SANTOS *et al.*, 2008).

Tabela 8. Médias dos teores de Pi (mg dm⁻³) obtidos no fracionamento do P do solo LVdf, primeira fase, perante as coberturas utilizadas e o tratamento ausência de planta (S/Planta).

	Cobertura do Solo				Soja				Milho			
	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca
	Calcário				Calcário				Calcário			
Braquiária	2,3	6,9	7,1	2,0	2,9	15,3	8,6b [*]	8,5	3,0	4,0	10,2	18,2
Sorgo	1,7	8,5	7,5	2,4	3,3	11,7	11,9ab	9,9	3,2	4,1	10,8	19,7
S/Planta	2	7,3	6,9	3,1	3,5	9,2	13,0a	8,8	3,0	3,8	9,0	15,5
DMS	0,7	3,4	1,0	1,6	1,0	7,3	3,4	4,3	0,4	0,5	3,7	8,3
	Escória de aciaria				Escória de aciaria				Escória de aciaria			
Braquiária	1,8	7,5	7,4	2,7	3,4	10,5	11,9	9,1	3,1	4,0	9,6	20,6
Sorgo	1,9	9,1	7,4	2,5	3,5	9,6	11,2	9,5	3,0	3,7	10,0	14,6
S/Planta	1,7	7,6	7,5	2,5	3,6	10,9	11,8	10,3	2,8	3,7	9,6	16,8
DMS	1,1	2,8	1,7	1,6	1,0	3,8	3,6	5,3	0,8	0,8	3,1	10,7
	Calcário + Escória de aciaria				Calcário + Escória de aciaria				Calcário + Escória de aciaria			
Braquiária	1,7	7,6	7,9	2,9	3,8	11,1	12,3	9,7	3,1	4,1	9,2	18,7
Sorgo	1,5	6,6	7,1	2,7	4,1	11,5	13,3	12,0	2,9	3,7	9,6	20,9
S/Planta	2,5	7,5	8,0	2,1	4,5	13,3	14,5	12,8	2,9	3,6	10,0	16,6
DMS	1,4	2,1	1,5	2,9	1,0	3,3	5,8	8,1	0,5	0,6	2,5	9,9

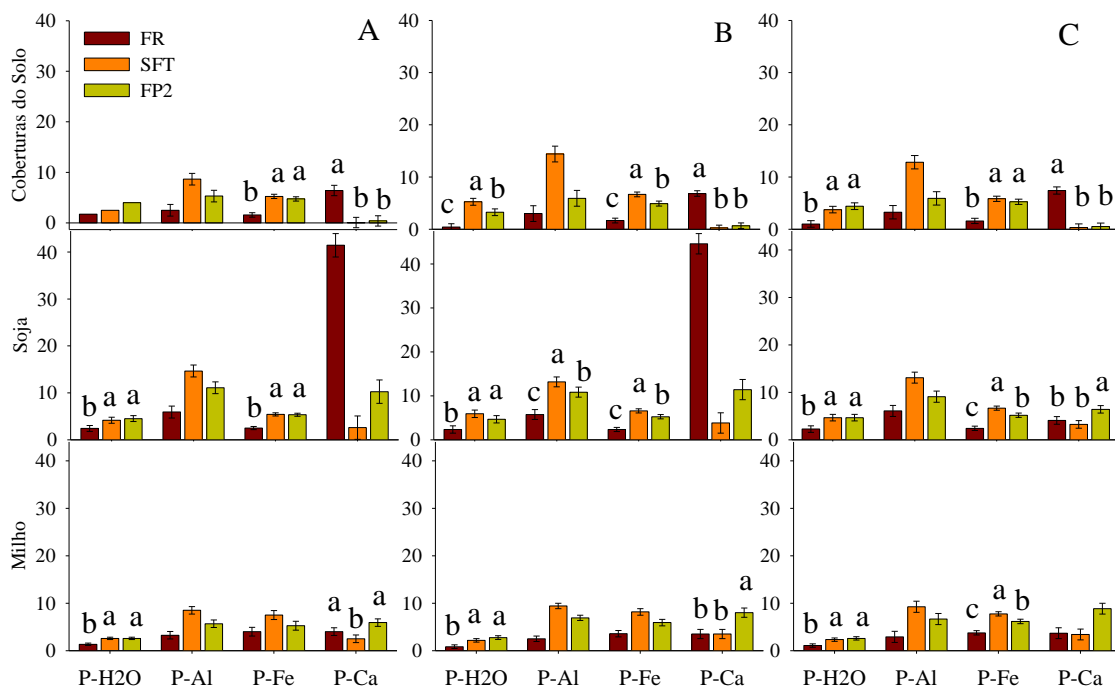
*Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo Teste Tukey 0,05.

A Figura 6 contempla o fracionamento inorgânico do P do solo LVd textura média na primeira fase do experimento. Da mesma forma como no solo LVdf, a fração P-H₂O é menor o compartimento de P no LVd, com teores entre 0,4 e 5 mg g⁻¹, sendo as fontes SFT e FP2 as que possuem os maiores teores de P.

A fração P-Al (Figura 6) teve os maiores teores de P, independentemente do corretivo utilizado, na fonte SFT, seguido pela fonte FP2 e FR, após as coberturas do solo. Após a soja observa-se aumento nos teores de P desta fração, e a consequente diminuição após o milho.

A fonte SFT foi responsável pelos maiores teores de P-Fe (Figura 6), independentemente do corretivo da acidez utilizado e dos cultivos. Os teores variaram entre 1,6 mg g⁻¹ (Coberturas – C+E, Figura6) à 8,16 mg g⁻¹ (Milho – Escória de aciaria, Figura 6). Os menores teores de P deste compartimento foram obtidos após o cultivo das coberturas, aumentando a partir desta coleta. Portanto, verifica-se que o maior compartimento de P do LVd é composto pelo P-Al e P-Fe. Este resultado era esperado, uma vez que nos solo estudado há predomínio de caulinita (64 a 78,5%), além de óxidos Al (1,5 a 3,5%) e vermiculita e mica em valores presumivelmente baixos. Na fração argila dos Latossolos são variadas as quantidade de caulinita, gibbsita, goethita e hematita, dependendo do material de origem, intensidade do intemperismo e drenagem do sistema, entre outros fatores (KER, 1997).

Figura 6. Fracionamento químico do P inorgânico (mg dm⁻³) no solo LVd após o cultivo das coberturas (CS), soja e milho, de acordo com os corretivos calcário (A), escória de aciaria (B) e calcário+escória de aciaria (C).



A fonte FR apresentou teores maiores de P-Ca (Figura 6) após as coberturas do que as outras fontes utilizadas, da mesma forma ocorrera após a cultura da soja,

nos tratamentos com calcário e escória. No entanto, na composição dos corretivos (C+E) esses valores diminuíram, sendo o FP2 que obteve os teores maiores. Após o milho, os teores de P-Ca, anteriormente elevados na presença de FR, diminuíram e mantiveram-se baixos.

Observou-se que após a cultura do milho no LVd, os teores de Ca no solo diminuíram (Figuras 2, 3 e 4). Esse fato pode ajudar a explicar a diminuição da concentração do P-Ca. De forma particular, a fonte FP2 possuía menor teor de Ca e maior teor de P comparada a FP1 (15 e 24,76% de Ca; 14,4 e 9,10 % P_2O_5 , respectivamente), então, como a adubação com estas fontes foi baseada no teor de P, o solo com FP2 recebeu menor quantidade de Ca. Outra provável explicação é de que pode haver a mobilização de P-Ca para as demais frações. Lacerda (2011), concluiu que a aplicação de FR aumentou os teores de fósforo ligado ao cálcio, ao ferro e ao alumínio, mas após solubilização do fertilizante, o fósforo da fração P-Ca foi mobilizado para as frações P-Al e P-Fe.

O fato da fração P-Ca ter sido menor que as frações P-Fe e P-Al, configura uma característica de solos mais intemperizados, pobres em Ca, pois à medida que vão se tornando mais ácidos, pela remoção de sílica e bases, formas mais solúveis de P-Ca são convertidas em P-Al e P-Fe (BAHIA FILHO; BRAGA, 1975).

O LVd é caracterizado como solo intemperizado, com presença de óxidos de Al e Fe e pH reduzido. No entanto, o pH do LVd, verificado após a correção e os sucessivos cultivos, permaneceu em torno de 6,0 durante as duas fases do experimento. Oxmann *et al.* (2008) ao incubarem mostras de sedimentos com diferentes valores de pH e quantificarem as espécies de P, puderam observar que a acidificação dos sedimentos resultou em diminuição da fração P-Ca, acompanhada por aumento de P-Al e P-Fe.

O efeito inverso pelo aumento do pH original dos sedimentos também foi observado. Além disso, o teor de Ca no solo era alto (53, 59 e 47 $mmol_c\ dm^{-3}$, após as coberturas, soja e milho, respectivamente), o que pode ter dificultado a solubilização do fosfato de cálcio. Mello e Perez (2009) afirmam que em solos ácidos de regiões tropicais não se espera a formação de fosfato de Ca, devido à limitada presença de Ca solúvel. No entanto, os solos usados nesse estudo foram corrigidos e receberam fontes de P com teor de Ca como o FR e o FP (1 e 2), além dos sucessivos cultivos das coberturas, da soja e do milho.

Ao analisar os teores médios de Pi das frações do solo LVd durante a primeira fase do experimento (Tabela 9), não foi observada nenhuma interação entre as coberturas (e o tratamento ausência de planta) e as frações de P. No entanto, pode-se observar que as frações tiveram o mesmo comportamento que as do LVdf após o cultivo das coberturas do solo.

Porém, após soja, observa-se que a fração P-Ca ganha espaço no compartimento de P do solo com calcário e com escória de aciaria, juntamente com o P-Al. Este comportamento não foi observado na composição dos corretivos após a soja, na qual o P-Ca diminuiu. E ainda, na composição de calcário e escória, nota-se que a braquiária proporcionou a redução dos teores de P de todas as frações, enquanto o sorgo e sem planta, aumentaram ou mantiveram seus teores.

Tabela 9. Médias dos teores de Pi (mg dm^{-3}) obtidos no fracionamento do P do solo LVd, primeira fase, perante as coberturas utilizadas e o tratamento sem planta (S/Planta).

	Coberturas do solo				Soja				Milho			
	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca
	Calcário											
Braquiária	1,9	4,6	3,6	2,4	3,7	12,1	4,6	18,3	2,1	5,9	5,1	4,2
Sorgo	3,1	5,7	4,1	2,2	3,6	9,8	4,4	20,0	2,1	5,8	5,8	4,3
S/Planta	3,1	6,1	3,7	2,2	3,6	9,7	4,2	19,9	2,1	5,6	5,8	3,8
DMS	3,2	2,3	0,8	2,0	1,2	2,5	0,6	5,0	0,5	1,6	1,8	1,6
	Escória de aciaria											
Braquiária	2,6	6,2	4,3	2,6	4,0	10,9	5,1	20,6	1,9	6,6	6,0	5,6
Sorgo	2,9	8,5	4,6	2,4	4,2	9,2	4,4	19,5	1,9	6,0	5,6	4,6
S/Planta	3,3	8,6	4,2	2,7	4,6	9,6	4,6	19,7	1,9	6,2	6,1	4,7
DMS	1,3	3,0	0,9	1,0	1,7	2,2	0,9	4,6	0,7	1,1	1,3	1,9
	Calcário + Escória de aciaria											
Braquiária	3,1	7,8	4,4	2,7	3,7	9,1	4,8	4,0	1,8	5,9	5,6	4,9
Sorgo	3,1	7,3	4,4	2,3	3,6	9,5	4,7	4,3	1,8	6,6	6,1	4,8
S/Planta	2,9	6,8	3,8	3,1	4,1	9,6	4,6	5,3	2,3	6,2	5,9	6,1
DMS	1,2	2,6	1,0	1,3	1,4	2,3	0,9	1,6	0,7	2,3	0,9	2,3

4.1.1.3 Análise química na planta

4.1.1.3.1 Teores de nutrientes na parte aérea da planta

Análises de nutrientes no tecido foliar vegetal referentes à primeira fase, são encontradas nas Figuras 7, 8 e 9 para as plantas cultivadas no LVdf, e o LVd nas Figuras 10, 11 e 12, referentes à comparação entre os tratamentos dos corretivos com as fontes de P utilizadas e entre os corretivos e as coberturas.

De maneira geral, os teores de N nas plantas foram maiores na cultura da soja, independente do corretivo, de forma que a fonte FR proporcionou os maiores teores em ambos os solos. No LVdf, observou-se que as coberturas (CS) tiveram o mesmo comportamento frente às fontes de P com calcário e escória, onde o FR apresentou os maiores teores, seguido pelo FP1. Na composição C+E, o FR continuou com os maiores teores de N, porém o SFT não diferiu estatisticamente ($p>0,05$) do FP1. Para as planta de milho e soja não foi observado diferença significativa com os corretivos, exceto no milho em C+E, no qual o FP1 diferiu das demais fontes, apresentando os maiores teores de N.

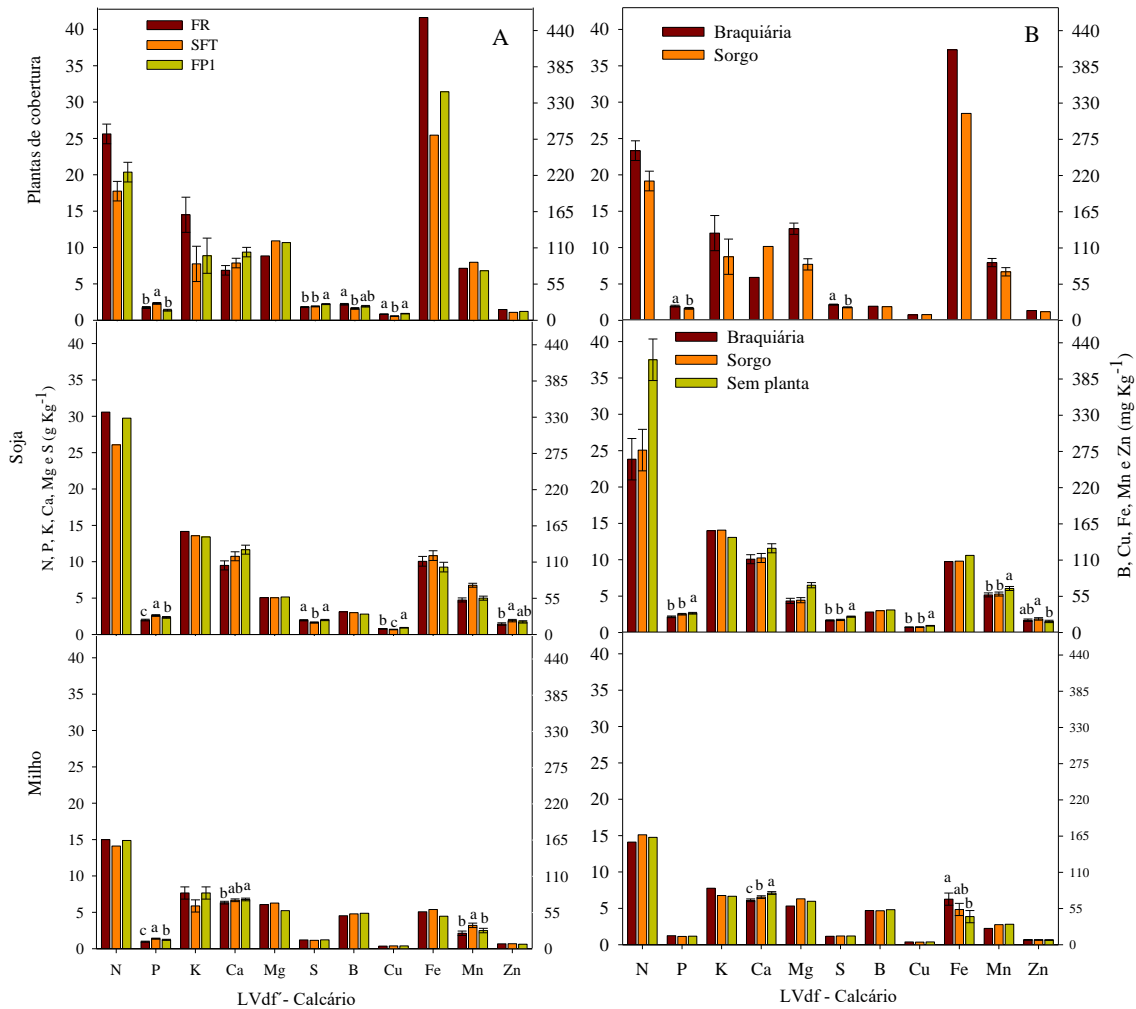
Ainda neste solo, observou-se que a braquiária absorveu mais N do que o sorgo sob calcário e escória. Foi observada diferença estatística nos teores de N na soja perante as coberturas usadas com todos os corretivos no LVdf, onde a soja cultivada nos vasos com ausência de planta obteve os maiores teores de N, não diferindo entre a presença anterior de braquiária ou sorgo. Já o milho, apenas diferiu estatisticamente com C+E, com maiores teores de N sob sorgo, o qual não diferiu do ausência de planta.

De forma semelhante, no LVd os teores de N na planta (Figuras 10, 11 e 12) foram sensivelmente superiores na cultura da soja, no entanto não foram significativos. Nas coberturas houve diferença estatística em todos os corretivos, no quais o FR apresentou os maiores teores de N, seguido pelo FP2. Já nos tratamentos escória e C+E, as fontes SFT e FP2 não diferiram entre si. A soja demonstrou diferença estatística apenas para o tratamento com calcário, no qual foi observado na fonte SFT o maior teor de N do experimento (33 g kg^{-1}). Os teores do nutriente no milho foram significativos apenas com os corretivos isolados, nos quais os teores maiores foram observados sob FP2, sendo que o SFT e FR não diferiram entre si.

Nos teores de N nas coberturas no LVd (Figuras 10, 11 e 12), apenas sob a escória foi observada diferença estatística ($p>0,05$), onde a braquiária apresentou o maior teor do nutriente. A soja, após as coberturas sob calcário apresentou teores de N significativos estatisticamente, no qual obteve maior teor de N após o cultivo com braquiária, porém não diferiu do sorgo, discordando de Castagnara *et al.* (2014), que observou que o cultivo consorciado da soja com *Brachiaria brizantha* cv. Marandu não tem influência sobre o teor de nitrogênio foliar. Já o milho, no mesmo corretivo,

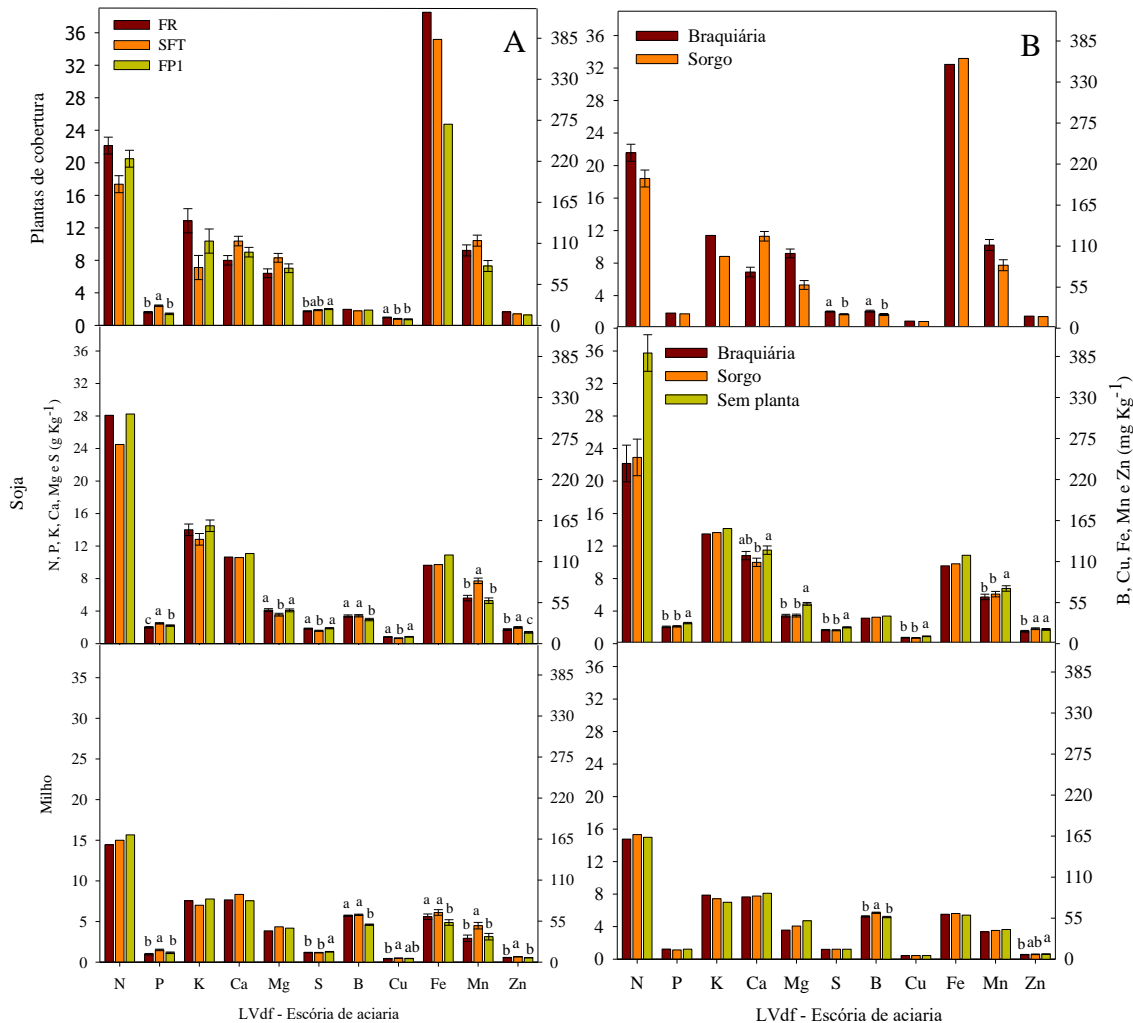
obteve maior teor foliar na ausência de plantas, o qual não diferiu do sorgo, que por sua vez não foi diferente da braquiária.

Figura 7. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente ao calcário no LVdf. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



Para Malavolta *et al.* (1999), a concentração adequada de N na folha, para uma produtividade de $2,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de soja, seria de 36 g kg^{-1} . Mesmo tendo sido feita a inoculação das sementes de soja utilizadas no experimento em questão, não foi possível alcançar este patamar de teor na cultura, nem para a cultura do milho, em ambos os solos, a qual apresenta como teores adequados de N, segundo Malavolta *et al.* (1997) e Raij *et al.* (1996), variam de $27,5$ a $32,5 \text{ g de N kg}^{-1}$ e de 27 a $35 \text{ g de N kg}^{-1}$, respectivamente, para os valores observados no LVdf. No solo LVd, os teores de N na soja corresponderam a $33,3$, $31,41$ e $31,83$ sob calcário, escória e C+E, respectivamente.

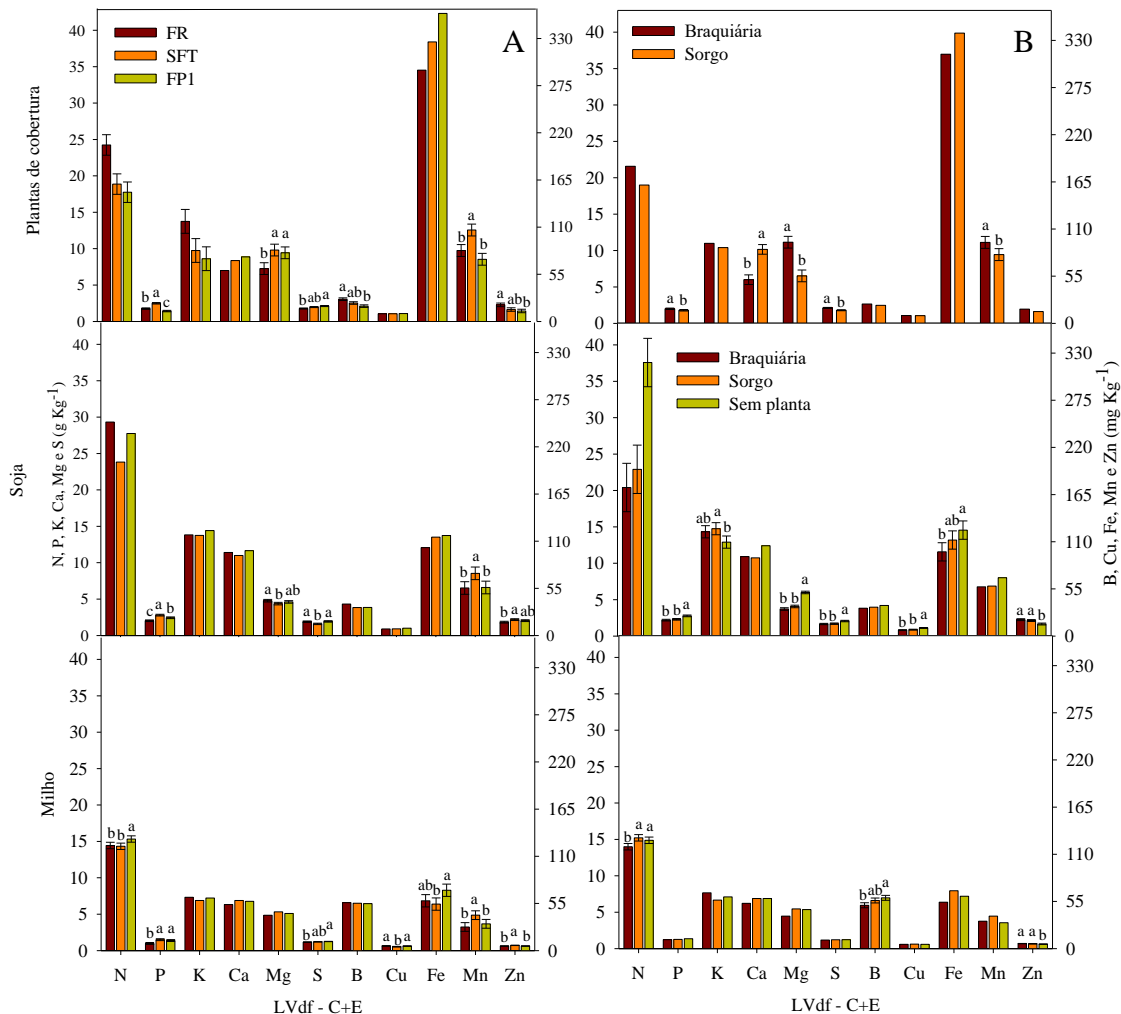
Figura 8. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente à escória de aciaria no LVdf. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



Quanto aos teores de P nas plantas no LVdf (Figuras 7, 8 e 9), observou-se que foram significativos estatisticamente ($p>0,05$) em todos os corretivos utilizados frente às fontes de P. Em todas as avaliações o SFT proporcionou os maiores teores do nutriente, independentemente do corretivo, exceto na composição C+E, na qual o SFT não diferiu do FP1, na cultura do milho.

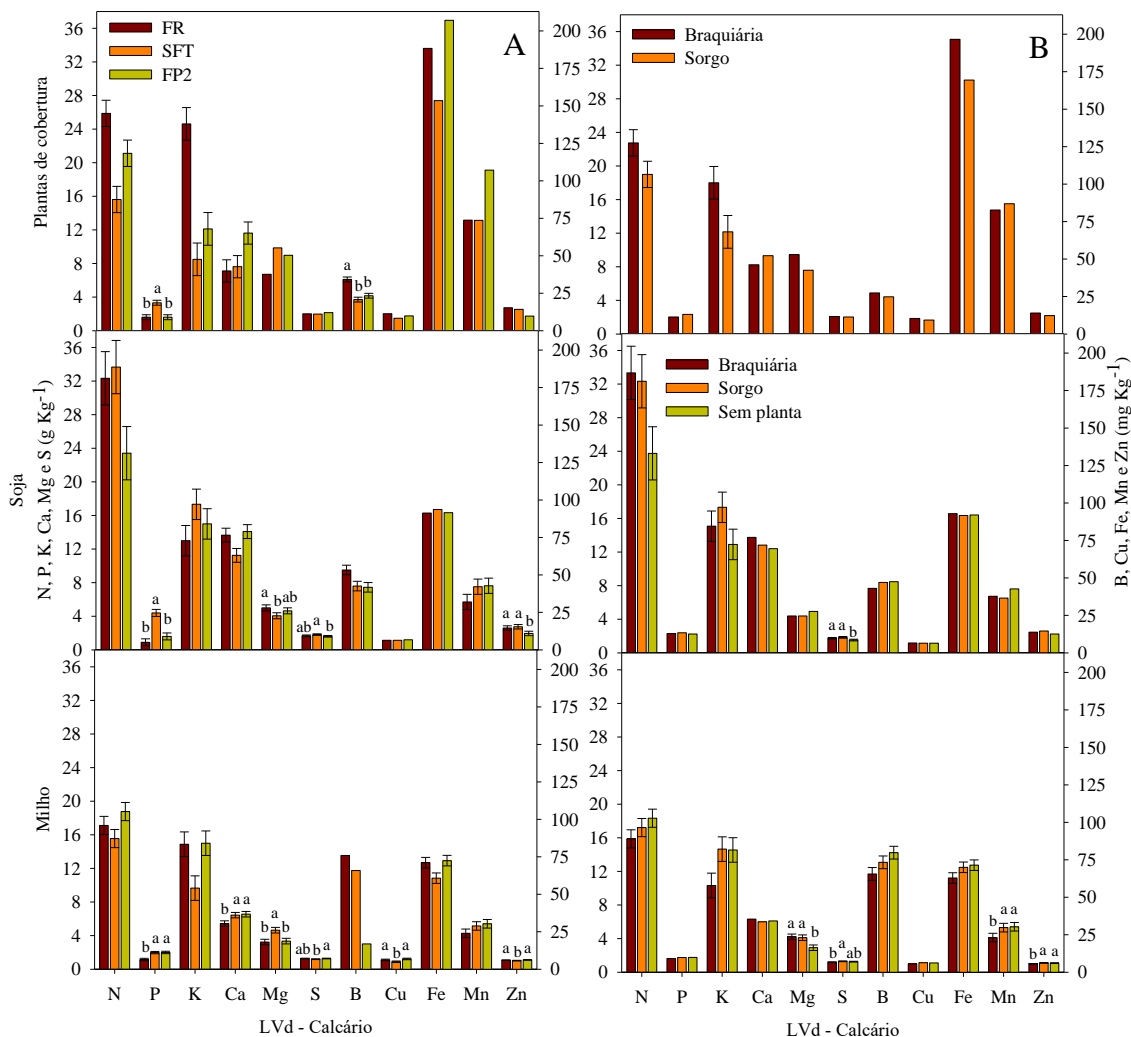
Assim como no LVdf, os teores de P nas plantas cultivadas no solo LVd também foram significativos para todos os corretivos e mais uma vez, o SFT foi a fonte com os maiores teores de P. Nas coberturas, o SFT obteve os maiores teores, enquanto o FR e FP2 não diferiram entre si. A soja apresentou os menores teores de P na fonte FR, assim como o milho, no qual, sob calcário ou escória, o FP2 não diferiu do SFT.

Figura 9. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) os teores foliares das coberturas (CS), soja e milho no tratamento com calcário + escória (C+E) no LVdf. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



Os teores foliares de P nas coberturas no LVdf com calcário (Figura 7-B) e na composição C+E (Figura 9-B) mostraram diferenças significativas ($p > 0,05$), onde observa-se que a braquiária absorveu mais P do que o sorgo. A exigência da *B. decumbens* é menor, em condições de campo, uma vez que mesmo em condição de ausência de adubação fosfatada, a espécie absorveu cerca de duas vezes mais P que a *B. brizantha* e *Panicum maximum* (CORRÊA; HAAG, 1993). CORRÊA *et al.*, (2003) observaram maiores teores de P disponível no solo com dose zero do nutriente sob a palhada de sorgo até 30 a 45 cm de profundidade.

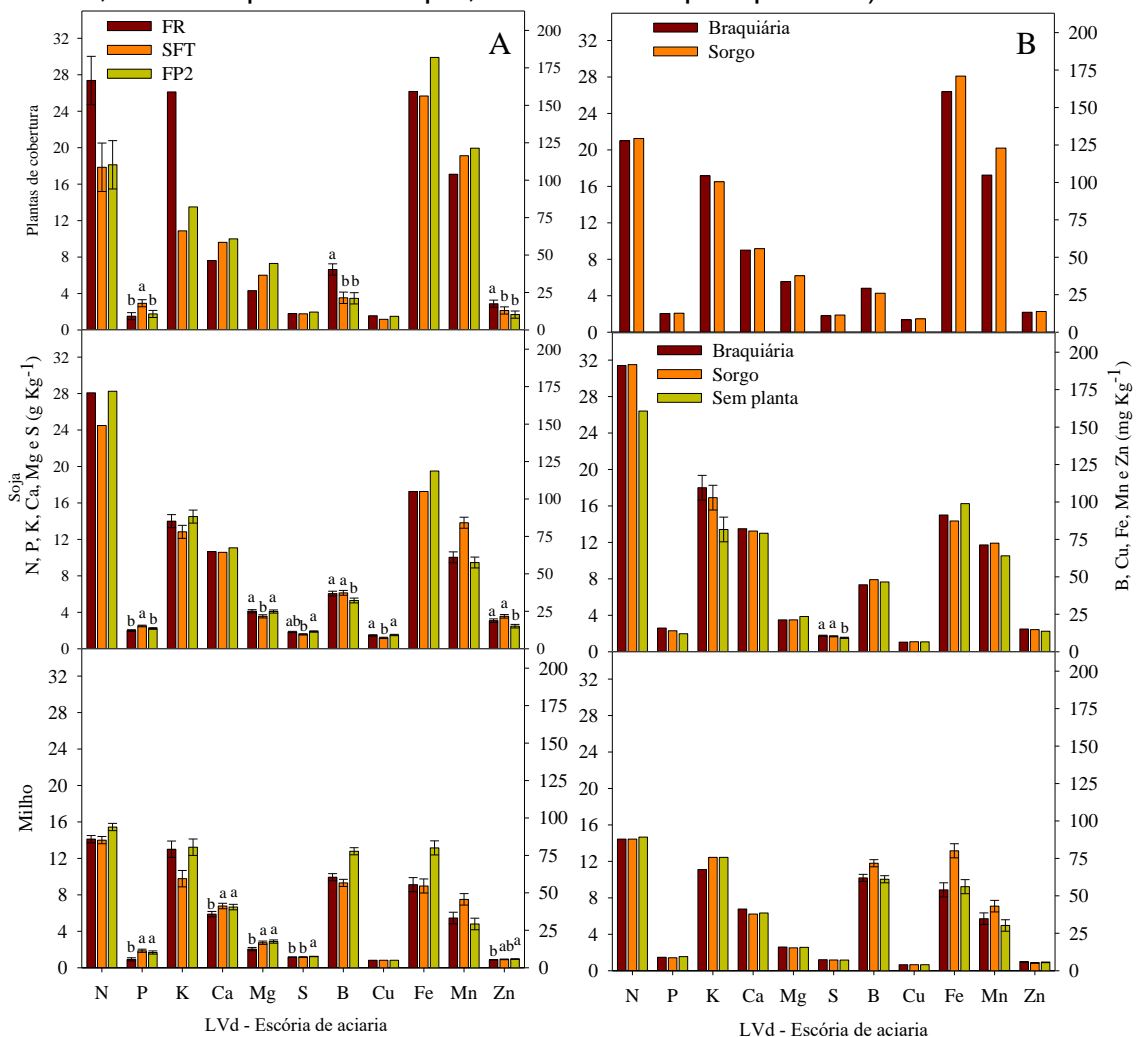
Figura 10. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente ao calcário no LVd. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



A soja apresentou teores de P significativos em todos os corretivos (Figuras 7-B, 8-B, 9-B) nos quais houve maior absorção de P no solo com ausência plantas de cobertura, e as plantas utilizadas (braquiária e sorgo) não apresentaram diferença entre si. Isso pode ter ocorrido devido à maior disponibilidade de P no solo na ausência de plantas. Para os teores de P no milho não houve diferença.

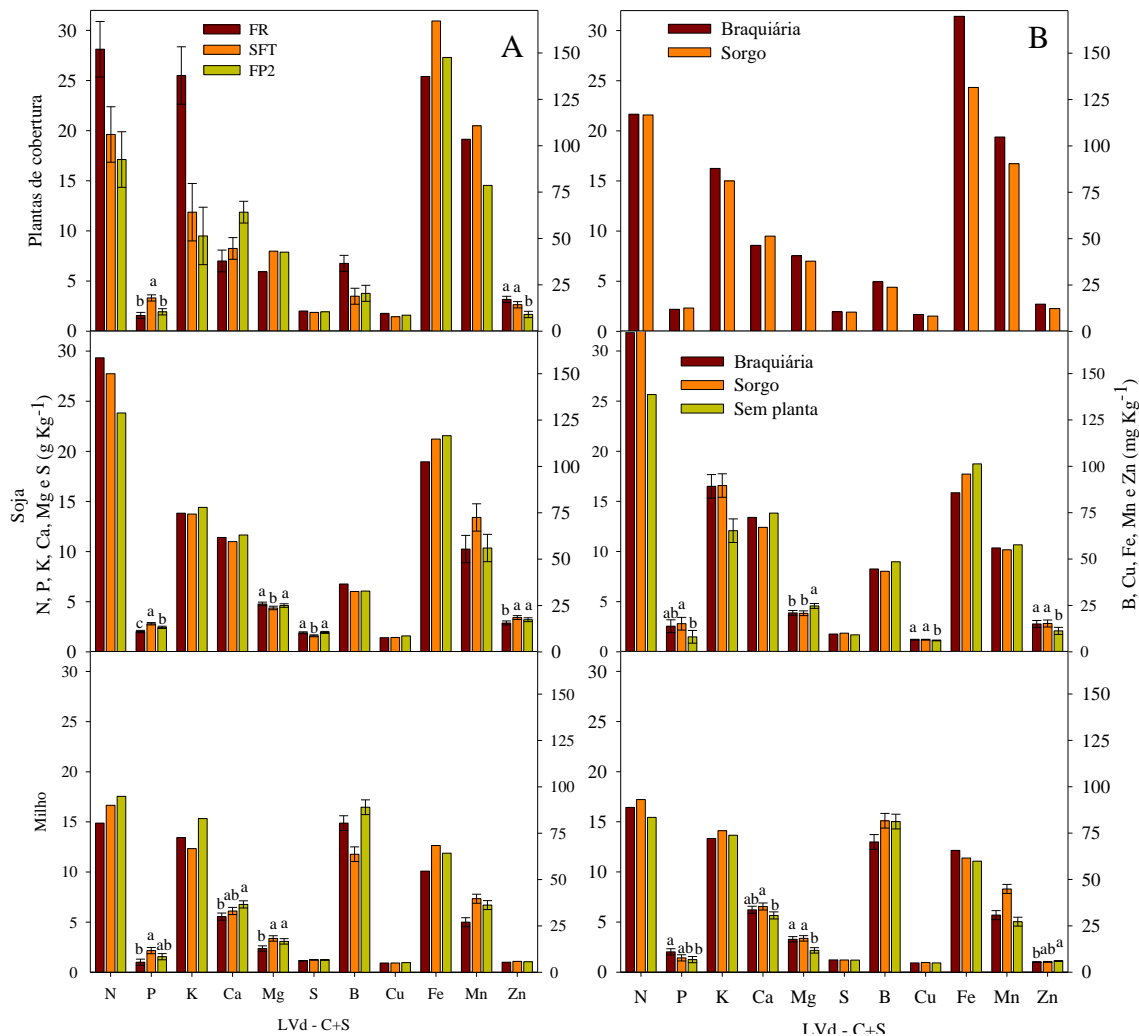
No LVd, para os teores foliares de P das culturas, apenas foi observada diferença significativa ($p > 0,05$) na cultura da soja e do milho com C+E (Figura 12-B). Na soja, o cultivo da braquiária e do sorgo proporcionou teores de P na folha de 2,55 e 2,8 g kg⁻¹, respectivamente, os quais não diferiram entre si. No entanto, no milho a presença da braquiária proporcionou o maior teor de P (2,03 g kg⁻¹) não diferindo do sorgo.

Figura 11. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente a escória de aciaria no LVd. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



O FR propiciou os maiores teores de K às coberturas sob todos os corretivos, não diferindo do FP1 com a escória de aciaria, no LVdf (Figuras 7-A, 8-A, 9-A). Para a soja, neste solo, observou-se diferença significativa ($p>0,05$) apenas no tratamento com escória (Figura 8-A), na qual o FP1 apresentou o maior teor de K, não diferindo do FR, o qual não diferiu do SFT. No milho, apenas os teores de K sob calcário foram significativo (Figura 7-A), onde as fontes FP1 e FR não foram diferentes entre si ao proporcionar os maiores teores de K ($7,66 \text{ g kg}^{-1}$, ambas as fontes). Observou-se o mesmo comportamento nos teores de K nas coberturas do solo LVd (Figuras 10-A, 11-A, 12-A), assim como a soja. Os teores de K no milho foram significativos nos corretivos isolados, nos quais o FR e o FP1, não diferiram entre si quanto aos maiores teores do nutriente.

Figura 12. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) nos teores foliares das coberturas (CS), soja e milho frente ao calcário no LVd. (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



No LVdf (Figura 7-B) os teores de K nas coberturas foram significativos estatisticamente ($p>0,05$) apenas sob calcário, onde a braquiária conseguiu absorver mais P do que o sorgo (23,33 e 19,16 g kg⁻¹, respectivamente), porém não diferiram entre si. Na soja (Figura 8-A), as coberturas não diferiram entre si ao proporcionar os maiores teores de K, 14,75 e 14,33 g kg⁻¹, para sorgo e braquiária, respectivamente.

No LVd as coberturas mostraram diferença significativa sob calcário (Figuras PL 4-11B) no qual a braquiária mostrou os maiores teores de K (18 e 12 g Kg⁻¹). Na soja, os teores de K foram diferentes estatisticamente ($p<0,05$) em todos os corretivos (Figuras 10-B, 11-B, 12-B), nos quais as coberturas proporcionaram os maiores teores, não diferindo entre si. Já o milho sob calcário (Figura 10-B) teve os maiores teores do nutriente nos tratamentos com sorgo e ausência de planta, sem diferenças entre os mesmos. Observa-se então que, mesmo o sorgo tendo

absorvido menor quantidade de K, comparado a braquiária, tanto a soja quanto o milho se beneficiaram do K da palhada do mesmo.

Sob o tratamento com calcário no LVdf (Figuras 7-A) os teores de Ca nas CS, soja e milho foram significativos estatisticamente ($p < 0,05$) e tiveram o mesmo comportamento, no qual o FP1 proporcionou os maiores teores do nutriente, não diferindo do SFT nos teores foliares da soja e do milho. No tratamento com escória de aciaria (Figura 8-A), os teores de Ca apresentaram diferença significativa apenas nas CS, com o SFT responsável pelo maior teor, já na composição C+E (Figura 9-A) não foram observadas diferenças estatísticas.

No LVd, os teores foliares de Ca no tratamento com calcário (Figura 10-A) comportaram-se de forma similar ao LVdf, sendo os maiores teores observados nas CS, decrescendo até a cultura do milho. Sob escória (Figura 11-A), os teores foram significativos ($p < 0,05$) nas CS e no milho, porém com comportamentos diferenciados. As CS obtiveram maiores teores de Ca sob a fonte FP2, sendo que o SFT não diferiu do FR. Já o milho, as fontes FP2 e SFT não diferiram entre si. Assim como sob escória, também sob C+E os teores de Ca foram estatisticamente diferentes nas CS e no milho, nos quais o FP2 mostrou-se superior às demais fontes, não sendo diferente no SFT no milho.

Os teores foliares de Ca nas culturas frente às plantas de cobertura utilizadas (Figuras 7-B, 8-B, 9-B) no LVdf, mostraram-se significativos ($p < 0,05$) para a escória e C+E, onde o sorgo demonstrou maior teor, já a soja, sob calcário e escória ($p < 0,05$) os teores de Ca foram maiores no tratamento sem planta, porém o sorgo e a braquiária não apresentaram diferenças entre si. O milho obteve os maiores teores de Ca sob calcário ($p < 0,05$), e da mesma forma que a soja, os tratamentos com braquiária e sorgo não diferiram, enquanto o maior teor foi alcançado ausência de planta. No LVd (Figura 12-B), apenas o milho demonstrou diferença significativa ($p < 0,05$) sob C+E, no qual os maiores teores foram obtidos com as coberturas (braquiária e sorgo).

Quanto ao Mg, os teores foliares avaliados nas CS cultivadas no LVdf (Figura 7-A) não foram significativos. No entanto, para a escória e a composição C+E ($p < 0,05$) foi observada influência das fontes de P nos teores das CS e da soja, as quais sob escória apresentaram o maior teor com SFT, já a soja com as fontes FR e FP1, as quais não diferiram entre si. Mesma situação foi observada na composição C+E, no entanto as fontes SFT e FP1 não foram diferentes entre si em proporcionar

os maiores teores de Mg. Para o milho ($p > 0,05$) não foi observada influência das fontes e dos corretivos nos teores foliares de Mg, possivelmente pela absorção indiferente da cultura.

As coberturas do solo não apresentaram diferença estatística ($p > 0,05$) para as fontes de P quanto aos teores de Mg no LVd, independentemente do corretivo. Na soja apenas a composição C+E foi estatisticamente significativa ($p < 0,05$), proporcionando os maiores teores de Mg junto as fontes FR e FP2, as quais não diferiram entre si. Já no milho, todos os tratamentos foram significativos, independente do corretivo usado. Sob calcário e C+E, o comportamento foi semelhante, onde no primeiro o SFT se sobressaiu as demais fontes ($4,6 \text{ g Kg}^{-1}$), enquanto o FR e o FP2 não diferiram entre si ($3,24$ e $3,35 \text{ g Kg}^{-1}$, respectivamente). Com escória, o FP2 apresentou o maior teor de Mg, $2,87 \text{ g Kg}^{-1}$. Na composição C+E, o SFT e o FP2 não diferiram entre si ($3,3$ e $3,0 \text{ g Kg}^{-1}$, respectivamente).

A braquiária e o sorgo no LVdf (Figuras 7-B, 8-B, 9-B) apresentaram diferença estatística ($p < 0,05$) em todos os tratamentos, nos quais a braquiária absorveu mais Mg do que o sorgo, não diferindo sob calcário. O mesmo acontece para a soja ($p < 0,05$), em todos os tratamentos independente do corretivo, as plantas de braquiária e sorgo cultivadas anteriormente a cultura proporcionaram menores teores de Mg, não diferindo entre si, comparadas ao tratamento sem plantas de cobertura. Já o milho, para este solo, não mostrou diferença ($p > 0,05$) independente do corretivo.

Independente do corretivo usado a braquiária e o sorgo não mostraram diferença estatística ($p > 0,05$) para os teores foliares de Mg (Figuras 10-B, 11-B, 12-B) no LVd. Assim, também, procedeu com a soja, exceto sob C+E ($p < 0,05$), onde as plantas utilizadas apresentaram teores menores e não diferentes entre si, que o sem planta. A cultura do milho, nos tratamentos Calcário e C+E ($p < 0,05$) obteve as maiores médias de Mg com o cultivo anterior das coberturas, as quais não diferiram entre si.

O último macro nutriente analisado foi o enxofre (S), o qual apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) para todas as fontes em todos os corretivos no LVdf (Figuras 7-A, 8-A, 9-A), exceto nos teores foliares do milho sob calcário. Nas CS, os teores de S foram favorecidos pelo FP1, independente do corretivo, não tendo diferido do SFT nos corretivos escória e C+E, enquanto que no LVd (Figuras 10-A,

11-A, 12-A), as CS não apresentaram diferença estatística ($p > 0,05$) entre as fontes de P e os corretivos utilizados.

Embora as escórias básicas de siderurgia possuam, além dos silicatos de Ca e Mg, algumas impurezas, entre elas o enxofre (PEREIRA *et al.*, 2003), os teores de S na soja apresentaram o mesmo comportamento para ambos os solos, e independente do corretivo, onde as fontes menos solúveis, FR e FP (1 e 2) não diferem entre si quanto aos maiores teores do nutriente, assim como para o milho.

Uma provável explicação para tais resultados poderia estar no incremento dos valores de pH, em ambos os solos, frente as essas fontes anteriormente mencionadas. A energia de ligação do sulfato ao solo é fraca, fato que potencializa sua percolação no perfil do solo, especialmente em solos de textura arenosa (OSÓRIO FILHO *et al.*, 2007; POZZA *et al.*, 2009). Sabe-se que o pH do solo interfere na energia de ligação dos grupos funcionais aos cátions metálicos estruturais dos argilominerais e óxidos do solo, e o incremento desses valores causa sua desprotonação, dificultando e até impedindo a adsorção de sulfato (CASAGRANDE *et al.*, 2003), podendo facilitar assim, a disponibilidade do S no solo.

O teores foliares de S na comparação entre os corretivos e as coberturas utilizadas no LVdf (Figuras 7-B, 8-B, 9-B), não foi observada diferença estatística na cultura do milho ($p > 0,05$). Nas CS ($p < 0,05$) a braquiária demonstrou maiores teores que o sorgo, em todos os tratamentos e, na soja ($p < 0,05$) o uso das plantas não demonstrou diferenças entre as mesmas, e os maiores teores foram encontrados no tratamento ausência de planta.

Já no LVd (Figuras 10-B, 11-B, 12-B), as CS ($p > 0,05$) não diferiram frente aos corretivos nos teores foliares de S. A soja, sob calcário e escória ($p < 0,05$) não apresentou diferença entre a braquiária e o sorgo, já o milho sob calcário ($p < 0,05$) obteve maiores teores de S com o sorgo, enquanto que com a braquiária e sem planta não foram diferentes entre si.

Em relação aos teores de micronutrientes referentes aos corretivos com as fontes de P e, aos corretivos com as plantas de cobertura são encontrados nas Figuras 7, 8 em 9, para o LVdf e nas Figuras 1, 11 e 12 para o LVd.

Os teores de boro (B) nas CS do LVdf, sob os corretivos calcário e C+E ($p < 0,05$) apresentaram os teores superiores as demais fontes com o FR com o calcário. Já no tratamento com escória de aciaria, tanto para a soja quanto para o

milho os maiores teores foram proporcionados pelos tratamentos com FR e SFT, os quais não diferiram entre si.

No LVd, as coberturas tiveram os teores de B significativos estatisticamente ($p < 0,05$) nos três corretivos usados, todos apresentando o mesmo comportamento, no qual o FR com teores superiores, enquanto as demais não foram diferentes entre si. Já na soja, somente o corretivo escória de aciaria ($p < 0,05$) proporcionou resultados significativos com as fontes FR e SFT com os maiores teores e não diferentes entre si. No milho, com escória e C+E, o FP2 apresentou os maiores teores do micronutriente.

Na relação corretivos e plantas de cobertura, no LVdf, os teores de B nas CS não foi significativo com calcário e C+E, apenas na presença da escória ($p < 0,05$), onde a braquiária obteve maior teor. A soja não apresentou significância ($p > 0,05$) para nenhum dos tratamentos, enquanto o milho sob escória ($p < 0,05$) obteve os maiores teores quando cultivado sob sorgo ($62,22 \text{ mg Kg}^{-1}$) e, sob C+E o maior teor foi no tratamento sem planta, mas o mesmo não diferiu do sorgo ($59,22$ e $56,11 \text{ mg Kg}^{-1}$, respectivamente). No LVd, os teores de B não foram estatisticamente significativos para as CS e a soja, independente dos corretivos. Na cultura do milho ($p < 0,05$), em todos os corretivos, a braquiária proporcionou os menores teores de B, no entanto, o sorgo e sem planta não diferiram entre si sob calcário e C+E, e sob escória, o sorgo proporcionou os maiores teores, e braquiária e sem planta não diferiram.

Os teores foliares de Cu, no LVdf, apresentaram diferença estatística ($p < 0,05$) para as fontes de P e os corretivos nas CS e soja na presença dos corretivos isolados, nos quais as fontes menos solúveis, FR e FP1 proporcionaram os maiores teores. O milho foi estatisticamente significativo sob calcário, com o maior teor no SFT, o qual não diferiu do FP1 e, sob C+E, as fontes FR e FP1 não tiveram diferenças entre si. No mesmo solo, os teores de Cu referentes a relação corretivos x plantas de cobertura, não demonstrou significância ($p > 0,05$) nas coberturas nem no milho, apenas na soja ($p < 0,05$), onde o FP1 proporcionou os maiores teores foliares do micronutriente, enquanto as fontes FR e SFT não diferiram entre si.

No LVd, os teores de Cu nas plantas de soja sob escória e de milho sob calcário foram diferentes estatisticamente ($p < 0,05$) frente as fontes de P usadas, onde as fontes FR e FP2 não foram diferentes entre si ao proporcionar os maiores teores. Frente às plantas de cobertura, apenas a soja sob C+E ($p < 0,05$) demonstrou

maiores teores com o cultivo sob as plantas de braquiária e sorgo, as quais não diferiram entre si.

Assim como na relação dos corretivos com as fontes, na relação com as coberturas, os teores foliares de Fe não apresentaram diferença estatística ($p > 0,05$) no LVdf. A soja apresentou maiores teores de Fe na presença do tratamento de calcário e SFT, a qual não diferiu do FR ($p < 0,05$) e, frente as coberturas apenas sob C+E no tratamento sem planta ($p < 0,05$) foi verificado o maior teor de Fe, o qual não diferiu do sorgo (123 e 112 mg Kg^{-1}).

Com relação aos teores foliares de Fe no solo LVd, frente as fontes de P usadas apenas o milho sob calcário e escória ($p < 0,05$) apresentaram diferenças estatísticas, onde o FP2 apresentou os maiores teores (72 e 80 mg Kg^{-1} , respectivamente), não diferindo do FR sob calcário (71 mg Kg^{-1}). Frente à relação dos corretivos com a braquiária e o sorgo, os teores foliares de Fe, para este solo, foi significativo ($p < 0,05$) apenas para a cultura do milho sob calcário, onde o tratamento sem planta proporcionou o maior teor (71 mg Kg^{-1}), não diferindo do sorgo (70 mg Kg^{-1}) e, sob escória com o maior teor com o sorgo (80 mg Kg^{-1}).

Quanto aos teores de Mn nas plantas no LVdf, perante as fontes de P, independente do corretivo, o SFT proporcionou os maiores teores do micronutriente nas CS, soja e milho, não diferindo do FR apenas no tratamento com escória. Frente ao uso das coberturas, o milho não demonstrou diferença significativa ($p > 0,05$) independente do corretivo. As CS foram significativas para todos os corretivos, com os maiores teores foliares de Mn na braquiária. A soja apresentou significância apenas nos corretivos isolados, nos quais as coberturas não diferiram entre si para os menores teores de Mn na planta.

No LVd, frente às fontes de P as CS não apresentaram diferença estatística ($p > 0,05$), assim como os seus teores frente aos corretivos. A soja, apresentou os maiores teores de Mn com SFT em todos os corretivos, não diferindo do FP2 sob calcário e, com relação ao cultivo de braquiária, sorgo e sem planta previamente, não foi verificada diferença. Já na cultura do milho frente as fontes de P, houve diferença ($p < 0,05$) em todos os tratamentos, sendo que sob calcário e C+E, os SFT e o FP2 não diferiram entre si para os maiores teores de Mn, e com escória o SFT apresentou o maior teor, e o FR e FP2 não diferiram entre si, pelos menores teores.

Os teores foliares de Zn, na CS do solo LVdf demonstraram diferença estatística apenas na composição C+E, na qual o FR apresentou o maior teor médio,

enquanto o SFT e FP1 não foram diferentes. Os teores de Zn nas coberturas perante os corretivos também não foram significativas ($p>0,05$). A soja apresentou influência das fontes de P e das coberturas nos teores de Zn, onde o FR e o SFT não diferiram entre si pelos maiores teores sob a escória, e sob calcário e C+E o SFT não diferiu do FP1 pelos maiores teores do micronutriente. Quanto às coberturas, sorgo e braquiária não diferiram entre si nos maiores teores sob calcário e C+E, e sob escória, o sorgo não diferiu do tratamento sem planta no maior teor. O milho foi significativo apenas na escória e C+E, onde o SFT apresentou os maiores teores médios de Zn. Já frente às plantas de cobertura, observou-se que perante o calcário e C+E, braquiária e sorgo não diferiram pelos maiores teores, já sob escória, o tratamento sem planta proporcionou maior teor de Zn, não diferindo do sorgo.

No solo LVd, os teores foliares de Zn nas CS foi significativo apenas no C+E com os maiores teores na fonte FR, não diferindo do SFT, já frente os corretivos, os teores não apresentaram diferença estatística ($p>0,05$). Os teores na soja foram maiores com o SFT, o qual não diferiu do FR sob calcário e escória, e do FP2 sob C+E. Quanto aos teores frente às plantas de cobertura, houve diferença ($p<0,05$) apenas no C+E, com os maiores teores perante as plantas, as quais não diferiram entre si. Na cultura do milho, sob calcário as fontes FR e FP2 não diferiram quanto aos maiores teores e, sob escória, as fontes FP2 e SFT. Frente às plantas de cobertura com calcário, o tratamento sem planta não diferiu do sorgo nos teores maiores, sob escória a braquiária proporcionou o maior teor e, sob C+E, sem planta foi o maior teor médio, e as coberturas não diferiram entre si pelos menores teores.

4.1.1.3.2 Massa de Matéria Seca - MMS

As coberturas (CS) cultivadas no LVdf (Tabela 10) apresentaram, na primeira fase do experimento, maior quantidade de MMS, para a fonte SFT, independentemente dos corretivos utilizados, não diferindo do FP1, nos tratamentos com calcário e a composição C+E. A soja e o milho não apresentaram diferença significativa para as fontes de P. O desempenho do SFT em proporcionar as maiores produções de MMS, deve-se, provavelmente, a sua solubilidade perante as outras fontes utilizadas, possibilitando maior disponibilidade de absorção desse nutriente pela planta, o que conseqüentemente proporcionou valores mais elevados de MSS. Com relação às outras fontes, de um modo geral, foram observadas melhores

produções quando se utilizou FP1, ao invés de FR, o que pode ser explicado pela maior disponibilidade da fonte FP1 em relação ao FR.

Já para as coberturas (sorgo e braquiária) e o tratamento sem planta (Figura 10), a soja no tratamento com calcário apresentou diferença significativa, assim como o milho no tratamento escória de aciaria, ambos tendo as maiores produções após o cultivo da braquiária, porém não diferiram do sorgo.

Tabela 10. Produção de massa de matéria seca (g vaso⁻¹) das coberturas (CS), soja e milho, cultivadas durante a primeira fase do experimento (2014/2015) no LVdf, em função das fontes de fósforo e presença (Sorgo e Braquiária) e ausência de planta de cobertura.

Fontes P/ CS	Calcário			Escória de aciaria			C+E		
	Braquiária Sorgo	Soja	Milho	Braquiária Sorgo	Soja	Milho	Braquiária Sorgo	Soja	Milho
FR	34,2b*	83,5	503,8	42,1b	78,1	507,0	37,1b	80,5	523,2
SFT	59,2a	80,2	515,1	58,9a	81,1	532,8	54,7a	87,6	525,3
FP1	48,6a	87,4	525,3	49,4b	82,1	548,3	56,2a	75,9	499,3
Sorgo	45,5	80,0ab	513,4	51,5	77,4	553,3a	49,8	79,3	517,8
Braquiária	49,4	93,0a	538,5	48,6	83,2	542,0a	48,9	81,8	534,9
Sem planta	-	78,1b	492,3	-	80,8	493,6b	-	82,9	495,1
DMS	7,99	12,93	59,85	6,17	12,24	42,98	8,27	17,28	64,18

*médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

O tratamento sem planta apresentou as menores produções de MMS, como era esperado, evidenciando ainda mais a importância da presença de palhada no solo para os cultivos subsequentes. Na Tabela 10, nota-se que as produções de MMS da soja e milho, independente do corretivo de acidez utilizado, foram menores para o tratamento que não teve o cultivo de plantas de cobertura (sem planta) previamente.

A maior produção de MMS das CS e do milho no LVd foi promovida pela fonte SFT, independente do corretivo utilizado. Com a utilização de escória de aciaria, a MMS das CS não obteve diferença significativa entre as fontes SFT e FP2. Por apresentarem um ciclo curto, as CS beneficiaram-se das fontes mais solúveis para a obtenção de maiores médias de MMS no LVd.

O milho beneficiou-se das fontes SFT e FR para a produção de maiores médias de MMS para os tratamentos escória de aciaria e C+E, nos quais não difeririam significativamente. A MMS da soja não obteve diferença significativa para nenhuma das fontes de P utilizadas. Observando-se a produção de MMS das culturas da soja e do milho sobre as coberturas do solo no LVd, foram maiores nos tratamentos com cultivo prévio de braquiária e sorgo, da mesma forma como no

LVdf. O milho com o calcário apresentou significância estatística, obtendo a maior produção na presença de sorgo, seguido pela braquiária. Já a soja, no tratamento C+E produziu maior MMS sob a braquiária.

A produção de MMS das coberturas no LVd (Tabela 11) foi significativa para as fontes de P nos três corretivos utilizados, sendo o SFT a fonte responsável pelas maiores médias. Sob escória de aciaria, as CS obtiveram produção não diferentes significativamente nas fontes SFT e FP2.

Tabela 11. Produção de massa de matéria seca (g vaso⁻¹) das coberturas (CS), soja e milho, cultivadas durante a primeira fase do experimento (2014/2015) no LVd, em função das fontes de fósforo e presença (Sorgo e Braquiária) e ausência de planta de cobertura.

Fontes P/ CS	Calcário			Escória de aciaria			C+E		
	Braquiária Sorgo	Soja	Milho	Braquiária Sorgo	Soja	Milho	Braquiária Sorgo	Soja	Milho
FR	4,6b*	66,2	284,1b	12,2b	63,2	322,1ab	10,4c	61,1	310,4ab
SFT	45,4a	73,2	494,8a	41,5a	67,5	437,9a	43,0a	68,7	392,6a
FP2	26,1b	62,0	188,5b	31,5a	71,8	242,2b	32,1b	60,5	218,9b
Sorgo	27	64,6	417,6a	26,6	66,0	387,7	30,0	58,4b	343,1
Braquiária	23,7	68,4	284,1ab	27,1	70,8	325	27,0	68,3a	330,8
Sem planta	-	68,5	265,7b	-	65,6	289,6	-	58,4b	247,9
DMS	5,2	13,5	43,5	6,8	12,8	21,6	4,11	9,6	42,7

*médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

Assim como as CS, o milho apresentou diferença significativa para as fontes em todos os corretivos, com as melhores médias produzidas sob SFT. O milho ainda demonstrou maior produção de MMS sobre o sorgo, não diferindo estatisticamente da braquiária. Já soja, obteve as maiores médias de MMS no tratamento C+E sobre a braquiária, não obtendo diferença significativa para as fontes, nem para as coberturas nos corretivos calcário e escória de aciaria para este solo. Vale destacar que, nos corretivos que continham escória (escória de aciaria e C+E) no LVd, o milho não apresentou diferença significativa nas médias de produção de MMS para as fontes SFT e FR.

A cultura da soja (Tabelas 10 e 11) produziu menor quantidade de MMS independentemente do corretivo utilizado, em ambos os solos, após a cultura do sorgo. Isto se deve ao fato de que o estabelecimento e o desenvolvimento inicial da soja pode ser prejudicados pelos compostos alelopáticos liberados pela decomposição da palha do sorgo, como tanino, alguns ácidos orgânicos e graxos, entre outros (OLIBONE *et al.*, 2006). O SFT é caracterizado como uma fonte de P solúvel que reage com maior intensidade no solo e, normalmente, fornecem P

solúvel ao sistema em taxas maiores, sendo caracterizados como fontes mais eficientes do que os fosfatos naturais a curto prazo. Porém os fosfatos naturais “moles”, de origem sedimentar como o fosfato natural (FR), que reagem no solo mais lentamente, podem apresentar um efeito residual compensatório, e o somatório da sua eficiência, quando estimada por períodos longos, e pode se igualar aos fosfatos solúveis, devido à perda do poder fertilizante destes.

4.1.2 Considerações Finais

O pH foi corrigido por todos os corretivos aplicados e pela composição entre eles, também foram observados incrementos nos teores de Ca, Mg, K e, conseqüentemente a SB. Todavia, o aumento nos valores foi mais pronunciado no LVd, uma vez que solos arenosos e/ou textura média, possuem menores teores de MO, conseqüentemente, menor poder tampão, observando-se neste solo, uma comportamento com menos alterações perante aos tratamentos. Neste solo, independentemente do uso dos corretivos e das coberturas, parte do fósforo adicionado na forma de SFT, a fonte referência, foi adsorvido aos óxidos de Fe, compondo a fração P-Fe.

Em ambos os solos estudados, pode-se observar que os teores de P após a adubação com as fontes, independentemente do corretivo proporcionou incremento do mesmo nos solos em comparação ao teor original. Esse incremento se intensifica após a cultura da soja, e decresce após o milho.

O FR aparece em todos os tratamento, em ambos os solos, como uma das fontes que proporcionou os maiores teores de micronutrientes, e também, nos solos, com os pH sempre intermediários, entre o maior e menor valor, no LVdf variou entre 5,52 e 5,88 e, no LVd entre 5,65 a 6,05.

As fontes alternativas usadas, FP1 e FP2 muitas vezes aproximaram seus resultados dos patamares alcançados pela fonte no fornecimento de P para o solo. Além disso, percebeu-se a influência dessas fontes, em ambos os solos nos teores de Ca, e conseqüentemente na CTC dos solos. Enquanto que o uso das coberturas de solo, braquiária e sorgo, não proporcionou efeito nos teores de macronutrientes e micronutrientes.

4.2 Fase 2

4.2.1. Latossolo Vermelho distroférico e Latossolo Vermelho distrófico

Durante a realização da segunda fase do experimento, apenas o tratamento com a composição calcário + escória de aciaria (C+E) foi conduzido, por ter apresentado resultados diferente dos outros dois corretivos utilizados na primeira fase, submetidos a análise de componentes principais (PCA).

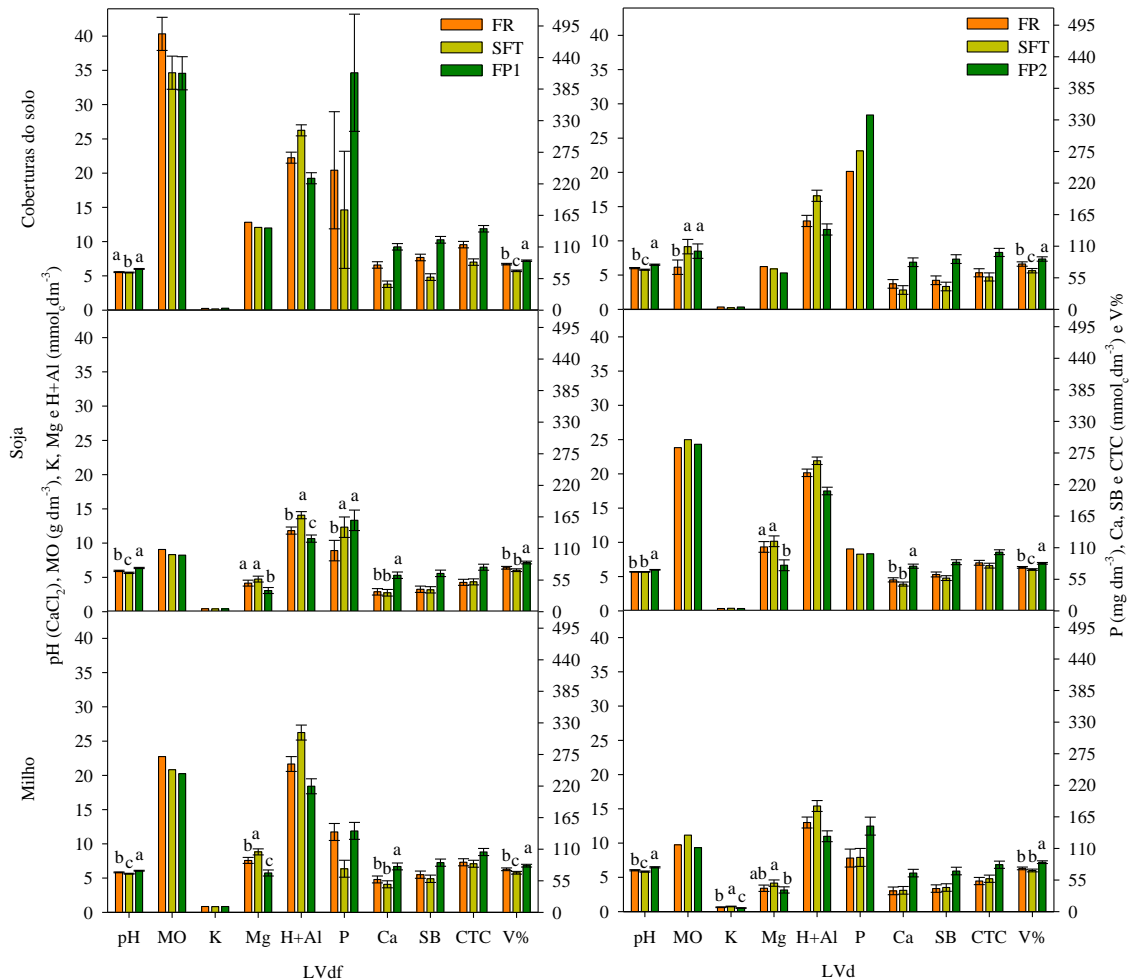
4.2.1.1 Análises químicas do solo

A Figura 13 apresenta os resultados das análises dos solos LVdf e LVd, após o cultivo das coberturas, soja e milho frente as fontes de P: Fosfato reativo (FR), superfostato triplo (SFT) e fosfato precipitado 1 e 2 (FP1 e FP2).

Os valores de pH nos solos LVdf e LVd tiveram, para as coberturas, o mesmo comportamento frente as fontes de P utilizadas, onde, nas três coletas realizadas, a fonte FP1 e FP2 alcançaram os maiores valores de pH, com teores ao redor de 6,0, sendo significativo em todas as coletas.

No LVdf, pós-soja (Tabela 14), os valores de pH foram significativos para as coberturas usadas previamente, tendo seu maior valor no tratamento ausência de planta (6,12) o qual não diferiu da braquiária (5,93). Isto se deve ao fato de que os cultivos alteram o pH da rizosfera pela absorção de cátions e ânions do solo (TAIZ & ZEIGER, 2004), reduzindo o pH do solo, o que foi verificado também no LVd (Tabela 16).

Figura 13. Resultado da análise do solo nos tratamentos com calcário + escória de aciaria e as fontes de P no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf - A) e no Latossolo Vermelho distrófico (LVd - B) após as coberturas do solo, cultura da soja e do milho. (Fosfato Natural Reativo, SFT-Superfosfato triplo, FP1- Fosfato precipitado 1).



Um dos principais responsáveis é a absorção entre N-NO^{-3} e N-NH^{-4} o que varia de acordo com a espécie vegetal, que no caso das leguminosas, pela fixação biológica de N há maior liberação de H^{+} e absorção de cátions, alterando o pH da região da rizosfera (MARSCHNER, 1995).

O SFT possibilitou para ambos os solos, em todas as coletas os maiores valores de H+Al, seguido pelo FR e FP (1 e 2). No LVdf (Figura 13-A) os valores iniciais, pós-plantas de cobertura são maiores quando comparados à coleta seguinte, pós-soja, voltando a aumentar na última coleta (pós-milho), ocorrendo o inverso no LVd (Figura 15-B).

Tabela 12. Resultado da análise de solo do Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), após as coberturas do solo (CS), soja e milho cultivados com sorgo, braquiária e sem cultivo (sem planta) na segunda fase do experimento.

Plantas de cobertura	pH	MO	H+Al	K	Mg	V%
	CaCl ₂	g dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----			
Após-CS						
Sorgo	5,6	37 ab*	23	0,2ab	11	76 b
Braquiária	5,6	39 a	23	0,1b	12	78 ab
Sem planta	5,7	32 b	21	0,3a	13	79 a
DMS	0,12	4,83	1,61	0,1	1,88	2,54
Após-Soja						
Sorgo	5,9 b	9	12 a	0,4	4	76
Braquiária	5,9 ab	8	12 a	0,4	4	77
Sem planta	6,1 a	8	11 b	0,4	3	80
DMS	0,19	1,79	1,05	0,19	0,87	4,86
Após-Milho						
Sorgo	5,8	22	21	0,9a	8 a	76
Braquiária	5,8	21	23	0,9a	7 ab	74
Sem planta	5,8	20	21	0,7b	7 b	75
DMS	0,13	2,55	2,18	0,13	0,87	4,72

*médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

Conforme os resultados de pH, o uso de plantas de cobertura alterou, moderadamente, os valores de pH do solo, mesmo após um único cultivo. A partir do cultivo das plantas de cobertura após todos os cultivos, verificou-se o incremento de H+Al nos tratamentos após-CS e após-soja no LVd (Tabela 13) e após-soja no LVdf (Tabela 12).

Os valores de V% (Figura 13) diferiram ($p < 0,05$) entre as fontes de P em todas as coletas realizadas. Este comportamento foi reiterado independente do solo utilizado, nos quais o FP1 (LVdf) e o FP2 (LVd) apresentaram os maiores de valores de V%, cerca de 85 e 84 % para o FP1 e FP2, respectivamente. Quanto ao uso das coberturas antes dos cultivos (Tabela 14), os valores de V% foram significativos apenas após-CS, alcançando seu maior valor no tratamento ausência de planta (76,58%), não diferindo da braquiária (78,5%), possivelmente devido a concentração de cátions originais do solo, como já referido na fase 1.

As demais fontes de P, FR e SFT, quanto aos valores de V% no LVdf (Figura 13-A) diferiram entre si na coleta após as coberturas (80 e 68%) e na coleta após-milho (75 e 69%), já na coleta após-soja não diferiram entre si. No LVd (Figura 13-B)

diferiram entre si as mesmas fontes na coleta após as coberturas (79 e 67%) e após-soja (75 e 72%, respectivamente).

Quanto ao K, os teores não apresentaram diferença estatística entre as fontes de P no solo LVdf e, no LVd, apenas na coleta após a cultura do milho ($p < 0,05$), na qual se sobressaiu a fonte SFT. Perante as coberturas utilizadas no LVdf (Tabela 15), os teores de K mostraram-se significativos após-CS e após-milho. Já no LVd (Tabela 13), os teores de K foram maiores no tratamento ausência de planta na coleta após-CS, já após-soja e após-milho as plantas de braquiária e sorgo proporcionaram maiores teores do nutriente neste solo. Com a ausência de plantas não houve absorção de K, tornando-o disponível. Enquanto que no cultivo da soja o K absorvido pela braquiária e pelo sorgo foi disponibilizado. Isto se deve a alta capacidade de mobilidade do K^+ , uma vez que não fica incorporado às cadeias carbônicas da matéria orgânica do solo, após a colheita ou senescência das plantas, retornando rapidamente ao solo em forma prontamente disponível para as culturas (RAIJ *et al.*, 1997), fazendo da palhada um reservatório expressivo de K no curto prazo no SPD (ROSOLEM *et al.*, 2003), o que se confirma, novamente, pelo cultivo posterior do milho.

O potássio é o nutriente acumulado e liberado em maior quantidade em gramíneas utilizadas como plantas de cobertura (SPAIN; SALINAS, 1985), portanto a liberação de nutrientes da palha, especialmente de K, pode representar um aporte significativo dele para a cultura subsequente (CALONEGO *et al.*, 2005; ROSOLEM *et al.*, 2006). Echer *et al.* (2012), ao avaliar o efeito de resíduos culturais de *B. ruziziensis* no crescimento inicial e no acúmulo de nutrientes na parte aérea do algodoeiro, observaram que presença de resíduos da parte aérea da braquiária na superfície do solo proporciona maior teor e acúmulo de K pelo algodoeiro.

Ainda neste solo, o cátion Mg^{2+} apresentou comportamento semelhante ao K, no qual a adubação com SFT proporcionou as maiores médias dos teores do nutriente para ambos os solos. No solo LVdf (Figura 13-A), observou-se diferença significativa apenas nos solos após a soja e o milho, nos quais os teores encontrados foram baixos e médios, independentemente das fontes utilizadas. No LVd (Figura 13-B), como no LVdf, os teores foram significativos nas coletas pós-soja e pós-milho. No entanto, no pós-soja deste solo foram obtidos teores de Mg de 10, 9 e 6 $mmol_cdm^{-3}$ para as fontes FR, SFT e FP2, respectivamente. Já após o milho, os teores foram reduzidos para 3, 4 e 3 $mmol_cdm^{-3}$, respectivamente.

Em relação a outro cátion de grande importância, os teores de Ca apresentaram-se semelhantes frente às fontes de P em ambos os solos estudados. Inicialmente (após as coberturas) no LVdf (Figura 13-A) os teores do nutriente eram maiores, e acabaram diminuindo na coleta seguinte (após-soja), voltando a aumentar na coleta após-milho. As fontes FP1 e FP2 predominaram com os maiores teores médios de Ca, em ambos os solos e em todas as coletas. O mesmo comportamento foi observado na SB (Figura 13) em ambos os solos analisados, mostrando diferença significativa para todas as coletas.

Em ambos os solos, a MO foi significativa apenas na coleta pós-plantas de cobertura. Frente as coberturas usadas previamente às culturas da soja e milho, os teores de MO apresentaram diferença estatística apenas após-CS no LVdf (Tabela 12), no qual o tratamento com braquiária obteve o maior teor (39 g Kg^{-1}) e, no LVd (Tabela 13) apenas foi verificada diferença ($p < 0,05$) após-milho com o sorgo (11 g Kg^{-1}).

Tabela 13. Resultado da análise de solo do Latossolo Vermelho distrófico (LVd), após as coberturas do solo (CS), soja e milho cultivados sobre a palhada de sorgo, braquiária e sem cultivo (sem planta) na segunda fase do experimento.

Plantas de cobertura	pH	MO	H+Al	K	Mg	V%
	CaCl ₂	g dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----			
Pós-CS						
Sorgo	6,0b*	8	14 ab	0,1 b	6	79 b
Braquiária	6,0ab	7	14 a	0,2 b	6	67 c
Sem planta	6,2a	7	12 b	0,5 a	5	87 a
DMS	0,17	2,11	1,63	0,26	1,97	7,53
Pós-Soja						
Sorgo	5,7b	23	21 a	0,4 a	9 a	75 b
Braquiária	5,8ab	27	19 b	0,4 a	10 a	72 c
Sem planta	5,8a	23	19 b	0,2 b	6 b	83 a
DMS	0,09	4,25	1,09	0,15	1,57	3,02
Pós-Milho						
Sorgo	6,0b	11 a	13	0,6 ab	3 ab	75 b
Braquiária	6,1ab	11 a	13	0,7 a	4 a	72 b
Sem planta	6,2b	8 b	12	0,5 b	3 b	86 a
DMS	0,17	2,38	1,59	0,09	0,92	4,74

*médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

Os valores da CTC apresentaram diferença significativa para as fontes de P usadas em todas as coletas realizadas em ambos os solos. O uso do FP1 e FP2 promoveu os maiores incrementos na CTC. No LVdf (Figura 13-A), os valores de

CTC na coleta após as coberturas do solo foram os maiores perante as demais coletas, sendo eles 141, 114 e 83 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$, respectivamente nas fontes FP1, FR e SFT. Por ocasião da coleta após a soja, esses valores decresceram para 77, 52 e 51 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$, respectivamente para as fontes acima. Na coleta após o milho os valores voltaram a subir, 105, 87 e 84 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$, respectivamente.

Considerando que as fontes em questão FP 1 e 2, possuem 25 e 15% de Ca, respectivamente, e como a CTC neste estudo foi calculada, poderia se admitir que provavelmente alterações na região rizosférica das coberturas do solo e do milho, teriam promovido a disponibilização de Ca, contribuindo assim, para o incremento nos valores de CTC, uma vez que a literatura cita que o cálcio apresenta maior preferência em relação ao magnésio no complexo de troca do solo. (YADARE; GIRDHAR, 1981). Além disso, as fontes de fósforo reagem diferentemente em função das características do solo, bem como características da planta, como: sistema radicular, CTC das raízes, exsudação de compostos ácidos ou básicos, dentre outros (FAGERIA *et al.*, 1999).

Já no solo LVd (Figura 13-B) os valores de CTC iniciaram na ordem de 99, 63 e 56 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$ para as fontes FP2, FR e SFT, respectivamente e aumentaram após a cultura da soja, tornando a diminuir na coleta após o milho.

Os teores de P no LVdf (Figura 13-A) foram significativos em todas as coletas ($p < 0,05$). Na análise após as coberturas pode ser observado que o maior teor de P ocorreu com a fonte FP1 (413 mg dm^{-3}), seguido pelo FR (243 mg dm^{-3}) e pelo SFT (174 mg dm^{-3}). Ainda na primeira fase do estudo, para o mesmo experimento com C+E, a fonte FP1, da mesma forma, demonstrou maior disponibilidade de P ao solo, não diferindo da fonte padrão (SFT). Este resultado demonstra que o teor de P mesmo após o cultivo das plantas na fase anterior (coberturas, soja e milho até a pré-florescência), aliado a apenas uma única aplicação (300 mg dm^{-3}) ainda possuía o nutriente em níveis altos ($>80 \text{ mg dm}^{-3}$). Durante a Fase I, no mesmo experimento (C+E) o FP1 apresentou altos de P (145 mg dm^{-3}) após as coberturas, aumentando após a soja (171 mg dm^{-3}) e diminuindo após o milho (139 mg dm^{-3}), demonstrando ser uma fonte promissora de P ao solo, em solos com fertilidade construída ou com deficiência severa de P, como concluiu Sandim (2016).

Por ocasião da coleta após-soja, o FP1 ainda disponibilizou P (160 mg dm^{-3}), no entanto o SFT não diferiu do mesmo (147 mg dm^{-3}). Já na última coleta, após-milho, com os teores médios já reduzidos, as fontes com menor solubilidade, FP1 e

FR proporcionaram os maiores teores de P (141 e 140 mg dm⁻³, respectivamente), não diferindo entre si.

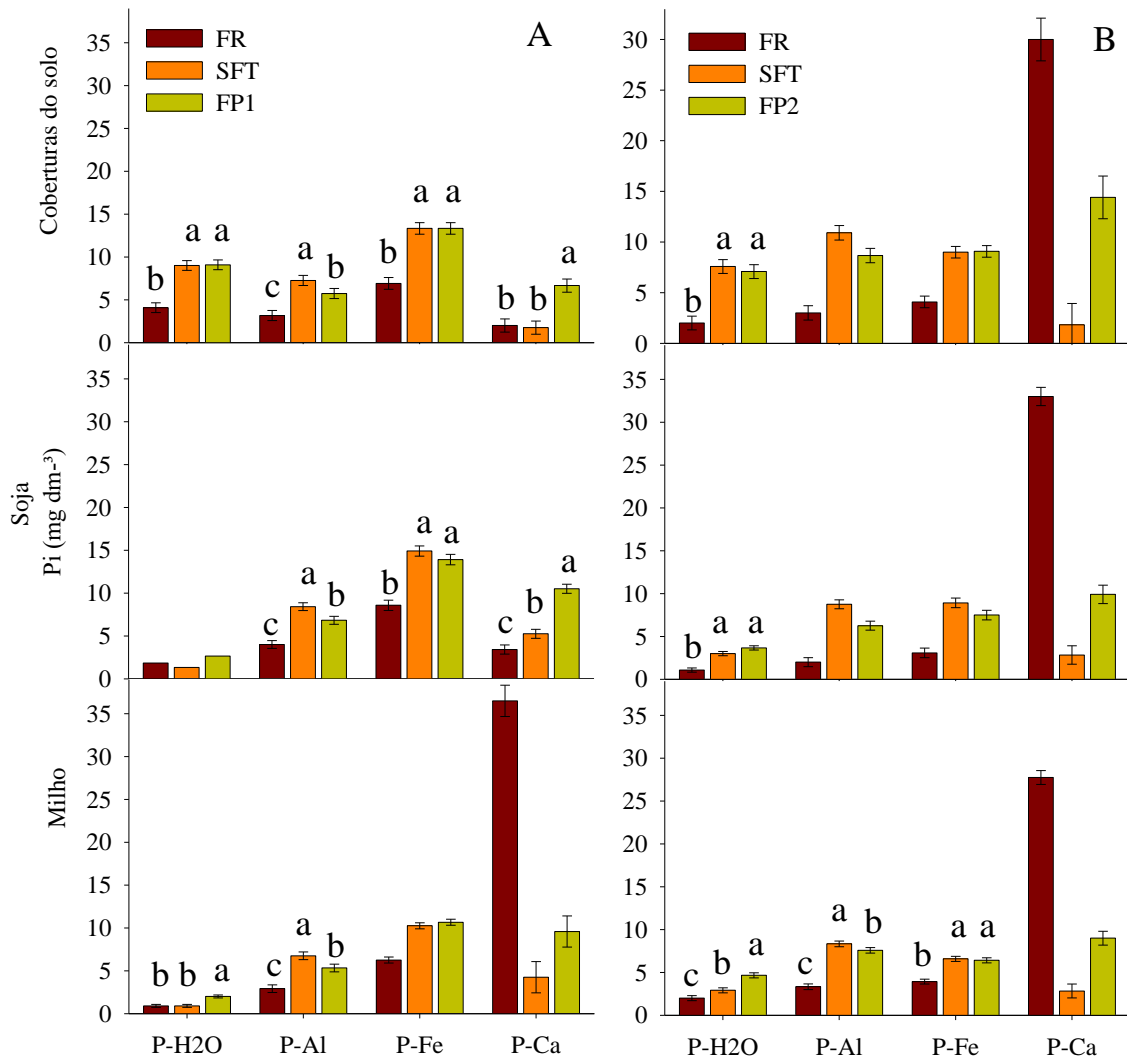
No solo LVd (Figura 13-B) os teores médios de P não apresentaram diferença significativa nas duas primeiras coletas (após as coberturas do solo e após a soja). Porém, após o milho a fonte FP2 (149 mg dm⁻³) foi superior às demais fontes avaliadas, SFT e FR que atingiram teores de 94 e 93 mg dm⁻³. Mesmo não apresentando diferença estatística ($p > 0,05$) entre as fontes, notou-se que após as coberturas do solo o FP2 atingiu o maior teor de P no solo, do qual a soja, como grande extrator de P, provavelmente beneficiou-se.

4.2.1.2 Fracionamento químico do P inorgânico

A fração de P-H₂O (Figura 14) manteve-se como a fração com o menor teor de P no solo LVdf. Após as coberturas do solo (braquiária, soja e sem planta), as fontes SFT e FP1 (9,0 e 9,08 mg dm⁻³) obtiveram maiores teores que o FR (4,08 mg dm⁻³). Após a soja e o milho, os teores de P solúvel diminuem independentemente da fonte de P utilizada, tal resultado era esperado, mostrando-se exaurida após tantos cultivos sem reposição externa por fertilizantes.

O compartimento com maior teor de P foi observado nas frações P-Al e P-Fe (Figura 14), tal resultado pode ser explicado devido a presença de goethita e/ou gibbsita que são os principais componentes da fração argila responsáveis pela adsorção de P nos Latossolos (NOVAIS; SMYTH, 1999). A substituição isomórfica do Fe por Al em goethita provoca o desarranjo estrutural pela redução do tamanho da célula unitária, contribuindo com maior superfície específica e, conseqüentemente, com maior adsorção de P (ROLIM NETO *et al.*, 2004). A fração P-Fe obteve os maiores teores de P, embora ambas as frações citadas tenham obtido maiores valores de P nas fontes SFT e FP1.

Figura 14. Fracionamento inorgânico do P em um Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf – A) e um Latossolo Vermelho distrófico (LVd – B) após os cultivos de plantas de cobertura, soja e milho sob diferentes fontes de P. FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 e FP2: fosfato precipitado 1 e 2.



Um resultado interessante a abordar é a comparação entre os teores de P-Al e P-Fe da composição C+E (Figura 5 e Figura 6) da primeira fase com os teores de P das mesmas frações da segunda fase do experimento (Figura 14), onde se percebe que, com a aplicação de 300 mg dm⁻³ de P no início de todo estudo, sem posteriores reposições, esses dois compartimentos mantiveram seus teores próximos, não havendo grandes variações.

Nos últimos anos tem-se observado bastante interesse no estudo da dinâmica do P nos solos através dos métodos de fracionamento de P inorgânico e orgânico. Muitos trabalhos demonstram que as formas mais disponíveis são tamponadas, principalmente pelo Pi extraído com NaOH 0,1 mol L⁻¹, o qual compõe, basicamente, o fator quantidade (RHEINHEIMER *et al.*, 2000), sendo pelo fracionamento utilizado

o correspondente a fração P-Fe. A magnitude dessa fração aumenta quando as adições superam as saídas e diminui em solos cultivados com baixa reposição do fósforo exportado. Mesmo não tendo sido feitas reposições de P, pode-se inferir que foi exportada pouca quantidade de P pelas culturas, uma vez que não foram cultivadas até o final do ciclo.

Na primeira fase do experimento (Figura 5), no solo LVdf fertilizado com FR, a fração P-Ca fixou mais P, com valores médios de 6, 25 e 32 mg dm⁻³, após as coberturas do solo, soja e milho, respectivamente. Este resultado, também foi verificado no LVd apenas após as CS e a soja, com a mesma fonte, e com FP2 após o milho, o que pode ter ocorrido devido ao elevado teor de Ca desta fonte, perante as outras utilizadas.

Na segunda fase (Figura 14) no LVdf, o P-Ca do FR diminuiu nas primeiras coletas após as CS e soja (2 e 3 mg dm⁻³, respectivamente), nas quais o FP1 obteve os maiores teores de P desta fração (6 e 10 mg dm⁻³, respectivamente). No entanto, após-milho, o FR voltou a apresentar aumento nos teores de P-Ca alcançando teor de 36 mg dm⁻³. Já no LVd, em todas as coletas o FR foi responsável pelos maiores teores, os quais mantiveram-se praticamente constantes, em média 32 mg dm⁻³.

A Figura 14-B também traz o fracionamento do Pi no LVd, na segunda fase do experimento. O P-H₂O apresentou, após as coberturas, teores de P mais elevados nas fontes SFT e FP2 (8 e 7 mg dm⁻³), enquanto o FR apenas 2 mg dm⁻³. Esses teores foram reduzidos no decorrer do experimento.

Assim como no primeiro experimento, o SFT proporcionou os maiores teores de P-Al, seguido pelo FP2. Curiosamente, durante os cultivos (coberturas, soja e milho) os teores de P desta fração parecem não ter sofrido sua influência, mantendo os teores próximos. O compartimento P-Fe seguiu o mesmo comportamento do P-Al.

Já o P-Ca apresentou teores de P elevados após todos os cultivos com a fonte FR, com média de teores de 32 mg dm⁻³, enquanto o FP2 com teor médio de 11 e o SFT de 2 mg dm⁻³, comportamento não identificado na fase anterior.

Tabela 14. Fracionamento inorgânico do P (mg kg^{-1}) no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) após as coberturas do solo, soja e milho cultivados sobre a palhada de sorgo, braquiária e ausência de planta (SP).

Plantas de cobertura	LVdf				LVd			
	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca	P-H ₂ O	P-Al	P-Fe	P-Ca
Coberturas do solo								
Sorgo	7,3	5,5	12,2a	3,0ab	5,8	7,5	7,3	16,5
Braquiária	7,5	5,5	10,8b	4,5a	5,5	7,4	7,5	17,9
SP	7,3	5,2	10,5b	2,8b	5,3	7,5	7,3	17,7
DMS	1,1	1,1	1,3	1,5	1,3	1,4	1,1	4,2
Soja								
Sorgo	1,9	6,9	13,0	6,7	2,4	6,1	6,8	16,3a
Braquiária	1,1	6,0	12,0	6,1	2,6	5,4	6,3	15,3a
SP	2,7	6,2	12,4	6,2	2,6	5,4	6,3	14,0b
DMS	1,7	0,9	1,2	1,0	0,5	1,0	1,1	2,1
Milho								
Sorgo	1,4	5,1	9,1ab	17,4	3,0	6,2	5,6	12,3
Braquiária	1,0	4,6	9,5a	15,5	3,0	6,1	5,3	13,6
SP	1,3	5,1	8,5b	17,3	3,4	6,8	5,8	12,7
DMS	0,3	0,9	0,7	3,6	0,6	0,6	0,6	1,6

*médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

De modo geral, foi observada pouca influência das culturas na dinâmica das frações de P no solo. No entanto, o que deve ser considerado é que a presença das plantas de braquiária e sorgo proporcionou o aumento nos teores de P das frações P-Fe e P-Ca.

4.2.1.3 Análise química na planta

4.2.1.3.1 Teores de nutrientes na parte aérea da planta

As Figuras 15 e 16 (LVdf e LVd, respectivamente) apresentam os teores de nutrientes nas coberturas, soja e milho, cultivadas na segunda fase do experimento, em ambos os solos, na composição calcário + escória de aciaria.

No LVdf (Figura 15), observou-se que os teores de N na soja foram influenciados pelas fontes, no qual as fontes menos solúveis (FR e FP1) proporcionaram os maiores teores do nutriente, 30 e 34 g kg^{-1} , respectivamente. No mesmo solo, a braquiária absorveu mais N do que o sorgo, o que era esperado, pois além do crescimento mais pronunciado, as braquiárias tem a capacidade de fixação biológica do N (FBN) (REIS JÚNIOR *et al.*, 2004), através da associação com bactérias diazotróficas, as quais, além da FBN, contribuem na promoção do

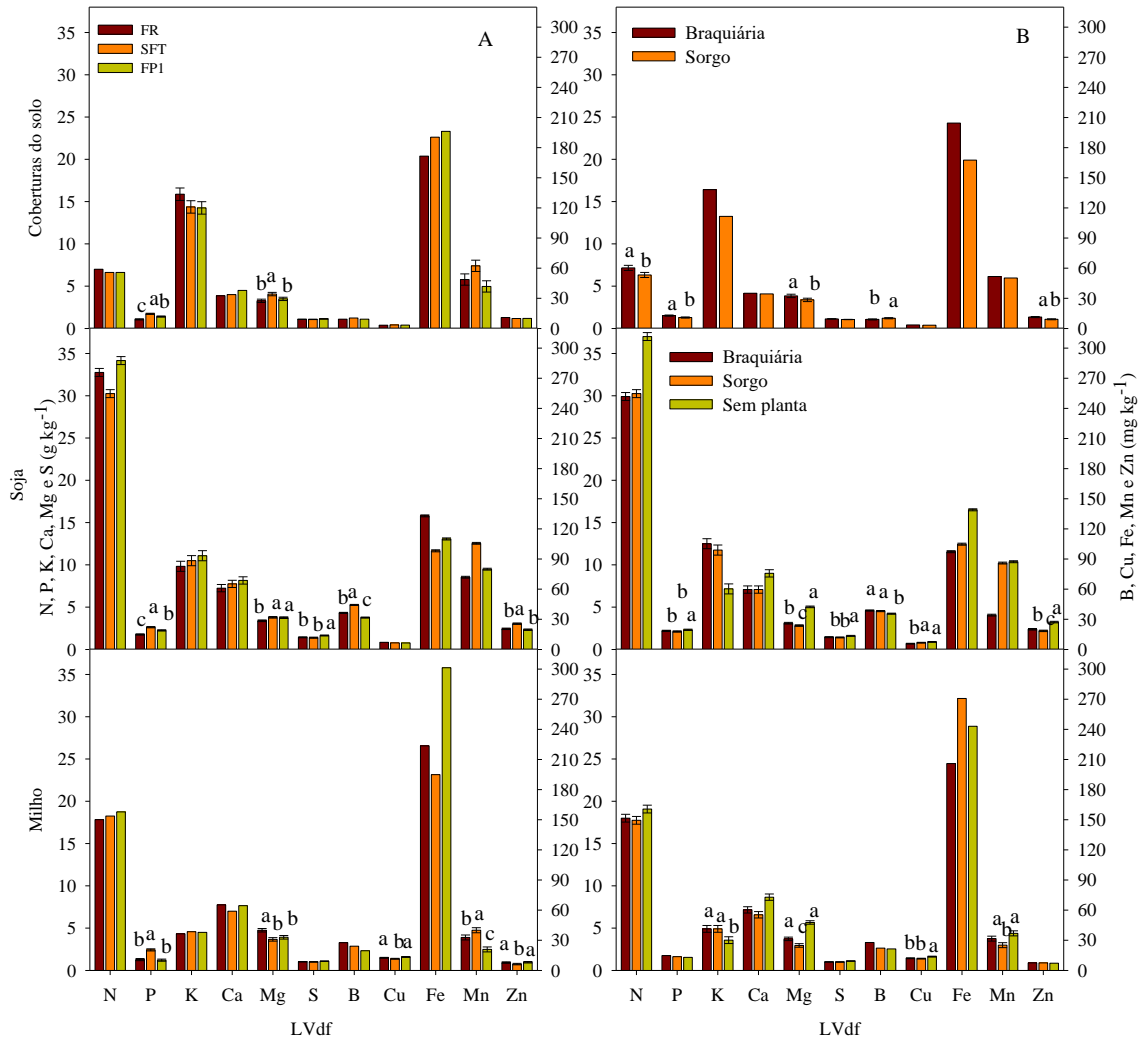
crescimento vegetal através de seus compostos orgânicos excretados (BASHAN; HOLGUIN, 1997). No entanto, o tratamento ausência de planta, tanto na soja quanto no milho foi responsável pelos maiores teores do nutriente nessas culturas. Tal resultado pode ser decorrente do baixo teor de N no solo original, no qual a ausência de plantas resultou no maior teor, enquanto a braquiária e o sorgo não diferiram entre si.

No LVd (Figura 16), as coberturas e a soja demonstraram diferença estatística ($p < 0,05$) para as fontes de P, onde o SFT proporcionou teor mais elevado do N nas coberturas (10 g kg^{-1}) e, na soja, o FR e FP2, demonstraram o mesmo comportamento que no LVdf, conferindo teores de N superiores, 28 e 27 g kg^{-1} , respectivamente. No entanto, em ambos os solos, os teores de N na soja foram inferiores ao nível crítico estimado por Malavolta (2006) de 55 a 58 g kg^{-1} . Mesmo as sementes de soja tendo sido inoculadas, poucos nódulos foram observados nas raízes das plantas. Para as coberturas, os teores de N no solo neste mesmo solo, foram significativos ($p < 0,05$), apenas após a cultura da soja com a braquiária e o tratamento sem planta não diferindo entre si nos maiores teores.

Os teores foliares de P (Figura 15-A), em ambos os solos, quando analisados perante as fontes utilizadas, nota-se o mesmo comportamento, no qual a fonte SFT ainda proporciona os maiores teores de P em todas as culturas, provavelmente devido a sua solubilidade ser maior quando comparada às demais fontes de P utilizadas, mesmo assim, os teores ficaram abaixo do suficiente, tanto para a soja ($4-5 \text{ g kg}^{-1}$) (MALAVOLTA, 2006) quanto para o milho ($1,9-3,5 \text{ g kg}^{-1}$) (BÜLL, 1993).

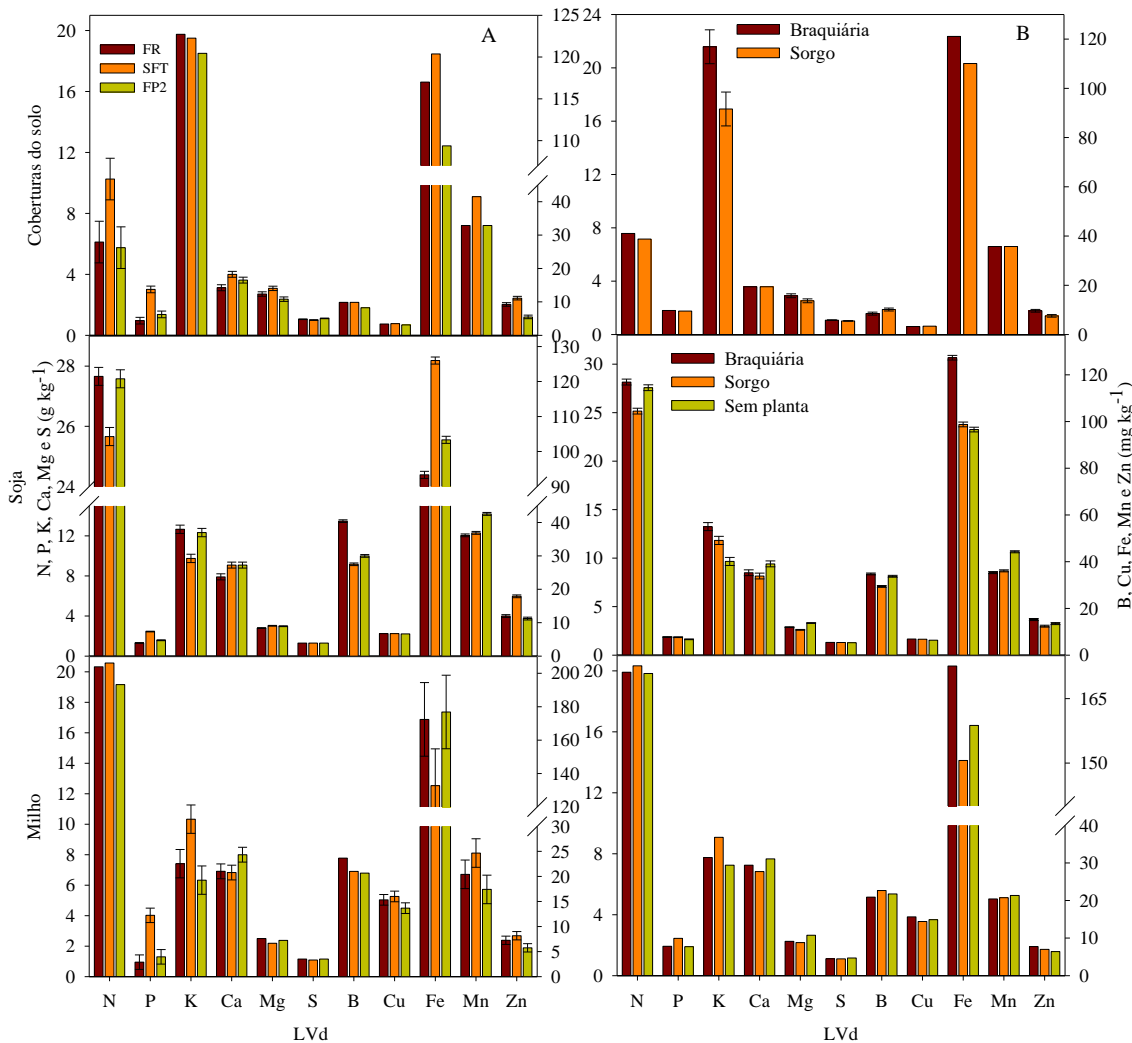
Quanto às plantas (Figura 15-B), a braquiária absorveu mais P (LVdf), advindo da fonte SFT, confirmando dados obtidos em campo sob SPD, com a mesma fonte (JANEGITZ, 2012), no entanto, não foi observado este comportamento na cultura da soja.

Figura 15. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) na análise foliar das coberturas, soja e milho frente ao calcário no LVdf, durante a segunda fase do experimento (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



O FR mostrou-se superior às demais fontes quanto ao teor de K nas coberturas (Figura 15-A), repetindo-se o mesmo efeito observado na fase I. Enquanto na soja, ocorreu o contrário. Referente às coberturas do solo (Figura 15-B), o cultivo da braquiária e sorgo proporcionaram os maiores teores de K (11 e 12 g kg⁻¹, respectivamente), assim como para o milho (5 g kg⁻¹, em ambas as coberturas). O K é o que mais rapidamente é liberado, sendo observado que, aos 30 dias, em torno de 95 % do seu conteúdo já havia sido liberado, segundo Teixeira *et al.* (2011).

Figura 16. Efeito das fontes de fósforo (A) e das coberturas (B) na análise foliar das coberturas, soja e milho frente ao calcário no LVd, durante a segunda fase do experimento (FR – fosfato reativo; SFT – superfosfato triplo; FP1 – fosfato precipitado 1).



No LVd (Figura 16-A), as fontes tiveram comportamentos antagônicos em relação aos teores de K na soja e no milho. Na soja, as fontes FR e FP1, apresentou teores de 13 e 12 g kg⁻¹, respectivamente, enquanto que no milho, o SFT proporcionou o maior teor, 10 g kg⁻¹. Mesmo assim, os teores de K são considerados insuficientes, estando abaixo do nível crítico estabelecido para a soja e milho, em ambos os solos (22-25 g kg⁻¹, para a soja e 17-29 g kg⁻¹ para o milho). Das plantas estudadas, a braquiária absorveu mais K (22 g kg⁻¹), demonstrando sua influência na cultura da soja, propiciando o maior teor de K nesta cultura (13 g kg⁻¹).

Os teores foliares de Ca foram mais influenciados pelas fontes de P no solo LVd do que no LVdf (Figuras 15-A e 16-A, respectivamente). Neste último, apenas a

cultura da soja demonstrou diferença significativa ($p < 0,05$), acompanhando o comportamento dos teores de K, não alcançando o nível crítico do nutriente de 9-10 g kg^{-1} (MALAVOLTA, 2006). No LVd, as fontes SFT e FP2 ($p < 0,05$) proporcionaram teores de Ca superiores ao FR nas coberturas (4 e 3 g kg^{-1} , respectivamente) e na soja (9 g kg^{-1} para ambas as fontes), sendo que no milho o FP2 foi superior as demais fontes, proporcionando teor de 8 g kg^{-1} , duas vezes maior ao nível crítico (BÜLL, 1993).

Quanto a participação das coberturas nos teores de Ca, ainda neste solo foi observado diferença estatística ($p < 0,05$) apenas na soja, na qual as coberturas não diferiram entre si pelos menores teores (8 e 8,5 g kg^{-1} , com braquiária e sorgo, respectivamente). No LVdf, as culturas da soja e do milho apresentaram o mesmo comportamento que no LVd frente às plantas de cobertura, obtendo os maiores teores de Ca no tratamento sem planta.

Os teores de Mg no tecido foliar das culturas, LVdf, apresentaram diferença ($p < 0,05$) após as coberturas do solo e a soja, nas quais as fontes SFT e FP1 foram superiores, com teores de 4 e 3 g kg^{-1} , respectivamente, em ambas os cultivos. Após o milho ($p < 0,05$) com o FR observou o teor de 5 g kg^{-1} de Mg, superior às demais fontes. No LVd, após as coberturas, o FR (2 g kg^{-1}) não diferiu do SFT (3 g kg^{-1}), pelos maiores teores de Mg. Já na soja, seguiu-se o mesmo resultado do LVdf. Assim como o K, o Mg é um nutriente rapidamente liberado, cerca de 81% do seu conteúdo no sorgo é liberado aos 30 dias (TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Os teores de S não foram significativos ($p > 0,05$) no LVd para nenhuma das fontes estudadas, bem como para nenhuma das coberturas ou das culturas da soja e milho. No LVdf, observou-se pequena diferença ($p < 0,05$) na cultura as soja frente às fontes, onde o FP1 proporcionou o teor de 1 g kg^{-1} , considerado teor insuficiente. Segundo Yamada & Lopes (1998), a soja está entre os maiores exportadores de enxofre da agricultura brasileira. Este nutriente se aproxima funcionalmente do nitrogênio, compartilhando grande versatilidade em reações de oxidação-redução, atributo esse que os torna fundamentais no metabolismo das plantas, além do mais, o enxofre é constituinte de alguns aminoácidos e de várias coenzimas. As assimilações de N e S são bem coordenadas, ou seja, a deficiência de um elemento reprime a via assimilatória do outro (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Considerando que o teor de N não foi alcançado, provavelmente a assimilação do S deve ter sido atingida, resultando em teores insuficientes. Quanto às plantas de cobertura, na

soja, a braquiária e o sorgo não diferiram entre si no menor teor do nutriente ($1,4 \text{ g kg}^{-1}$, em ambas as coberturas).

Quanto aos teores de micronutrientes nas coberturas frente às fontes de P, apenas o Mn (LVdf) e o Zn (LVd) demonstraram diferença significativa ($p < 0,05$). Ambos apresentaram os maiores teores para o SFT (62 g kg^{-1} de Mn e 11 g kg^{-1} de Zn). O B foi significativo para as coberturas (10 mg kg^{-1}), em ambos os solos, nos quais o sorgo absorveu mais B do que a braquiária. Sabendo-se que o sorgo apresenta valores de acúmulo de B próximos a zero nos estádios iniciais do desenvolvimento, aumentando no decorrer no desenvolvimento, tendo um pico a partir da diferenciação, quando há maior absorção de nutrientes e acúmulo de matéria seca (FRANCO, 2011), tal fato pode ter auxiliado no desempenho superior a braquiária.

Na soja, os teores de B, Fe, Mn e Zn foram estatisticamente significativos ($p < 0,05$) frente às fontes de P, em ambos os solos. Quanto aos teores de B, observou-se comportamentos distintos, onde no LVdf, o SFT proporcionou teor superior (44 mg kg^{-1}), considerado suficiente. O boro, embora não tenha ação direta sobre a fixação biológica, é um elemento que ativa a enzima fosforilase do amido, responsável pela síntese de amido, substância de reserva das sementes (FAVARIN; MARINI, 2000). Enquanto que no LVd, observou-se o menor teor para esta fonte (27 mg kg^{-1}), onde o FR foi superior no teor de B (40 mg kg^{-1}). Mesmo assim, em ambas as fontes os teores são considerados insuficientes para a soja ($40\text{-}45 \text{ mg kg}^{-1}$). Devido a funções similares ao Ca, a deficiência de B pode acarretar diminuição do Ca na folha, uma vez que o B afeta a translocação e absorção de Ca e de K na planta (PLESE *et al.*, 1998).

O FR influenciou o maior teor de Fe na soja no LVdf, seguido pelo FP1, já no LVd, o SFT apresentou o maior teor do micronutriente na soja, também seguido pelo FP2. O Mn teve os maiores teores apresentados perante o SFT (LVdf) e FP2 (LVd). Já o Zn, teve o mesmo comportamento em ambos os solos, com o maior teor frente ao SFT.

No milho, os teores foliares de Cu, Mn e Zn foram diferentes estatisticamente ($p < 0,05$) frente a fontes de P no LVdf, assim como no LVd, no qual o Fe também demonstrou sofrer influência das fontes ($p < 0,05$). Os teores de Cu no milho, no LVdf foram inferiores que no LVd, nos quais o FR e FP1 não diferem entre si pelos maiores teores, assim como o FR e SFT também não, respectivamente.

O milho apresentou diferença no LVd nos teores de Fe ($p < 0,05$), onde não foi observada diferença entre as fontes de P FR e FP2 (176,83 e 172,41 mg Kg⁻¹, respectivamente). Os teores foliares de Mn tiveram o mesmo comportamento em ambos os solos, nos quais os maiores teores foram verificados com o SFT, o qual não diferiu do FR no LVd.

As plantas de braquiária e sorgo, nos dois solos, apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) nos teores foliares de B, onde o sorgo obteve maior teor (10 mg kg⁻¹), em ambos os solos, e Zn, no qual a braquiária absorveu mais (9 e 11 mg kg⁻¹, no LVd e LVdf, respectivamente).

No LVdf, as coberturas influenciaram a absorção de B pela soja ($p < 0,05$), diferindo da ausência de plantas, enquanto no LVd, a presença da braquiária proporcionou o maior teor (34 mg Kg⁻¹), seguida pelo tratamento sem planta (33 mg kg⁻¹).

Os teores de Cu, Fe e Zn, no LVdf, tiveram o mesmo comportamento, no qual a soja demonstra maiores teores frente ao tratamento sem planta (7 e 139 mg kg⁻¹, respectivamente). Possivelmente demonstrando que a presença de plantas de cobertura anterior a cultura da soja, possa influenciar nos teores foliares desses micronutrientes, para este tipo de solo.

Já no LVd, os teores foliares de Fe na soja foram maiores sob a braquiária (127 mg kg⁻¹), seguida pelo sorgo (98 mg kg⁻¹). Embora o teor foliar nas coberturas não apresentando diferença ($p > 0,05$), a braquiária teve a tendência de maior absorção de Fe em ambos os solos, o que possivelmente pode ter influenciado o maior teor foliar do nutriente na soja sob a braquiária com o SFT.

A soja apresentou maiores teores foliares de Mn no tratamento sem planta (87 mg kg⁻¹) no LVdf, o qual não diferiu do sorgo (86 mg kg⁻¹). Já no LVd, o tratamento sem planta influenciou o maior teor de Mn na soja (44 mg kg⁻¹), enquanto a braquiária e o sorgo não diferiram entre si pelos menores teores (36 e 35 mg kg⁻¹). Os teores de Zn, no LVdf foram maiores no tratamento sem planta (27 mg kg⁻¹) frente ao uso das plantas de braquiária e sorgo (20 e 18 mg kg⁻¹). Já no solo LVd, a braquiária influenciou o maior teor (15 mg kg⁻¹) e o sorgo o menor (12 mg kg⁻¹).

No LVd, os teores foliares do milho não apresentaram diferença estatística ($p > 0,05$) frente a utilização das coberturas para nenhum dos micronutrientes analisadas. Enquanto que no LVdf os teores de Cu ($p < 0,05$) na cultura apresentaram menores teores frente à braquiária e o sorgo (12 e 11 mg kg⁻¹), os quais não

diferiram entre si, assim como os teores de Mn ($p < 0,05$), 31 e 25 mg kg⁻¹, respectivamente.

4.2.1.3.2 Massa de Matéria Seca - MMS

A Tabela 15 apresenta a produção de MMS das plantas cultivadas em ambos os solos estudados durante a segunda fase do experimento, na qual apenas o tratamento C+E foi utilizado.

A produção de MMS no LVdf de todas as plantas apresentou diferença significativa para as coberturas e o tratamento sem planta, no entanto, isto não se repetiu para as fontes de P utilizadas.

Dentre as coberturas do solo, o sorgo obteve maior produção de MMS em ambos os solos, sendo as maiores médias observadas no LVdf. A soja não apresentou diferença estatística para as fontes de P em ambos os solos. Já para as coberturas utilizadas, no LVdf, apresentou a maior média de MMS para o tratamento sem planta. Assim como o milho, para o mesmo solo.

Já no LVd, houve diferença significativa apenas para o milho em relação às fontes de P, onde o SFT e o FP2 não diferiram entre si para as maiores médias.

Tabela 15. Produção de massa de matéria seca (g vaso⁻¹) das coberturas (CS), soja e milho, cultivadas durante a segunda fase do experimento (2015/2016) no LVdf e LVd, em função das fontes de fósforo e presença (Sorgo e Braquiária) e ausência de planta de cobertura.

Fontes de P / Plantas de cobertura	LVdf			LVd		
	CS	Soja	Milho	CS	Soja	Milho
FR	50,7	132,3	361,1	34,0	104,9	264,9b
SFT	47,0	140,0	355,6	27,7	148,2	318ab
FP1/FP2	48,8	138,4	389,4	32,7	146,1	333,9a
Sorgo	60,8a*	106,9b	336,7b	36,6a	137,8	305,2
Braquiária	36,9b	130,8b	362,5ab	25,3b	136,9	314,2
Sem planta	-	172,9a	407,0a	-	124,6	297,3
DMS	4,1	31,1	44,7	7,3	51,3	66,6

*médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

Durante esta fase do estudo fica evidente a importância das fontes de P com menor solubilidade em ambos os solos estudados, de forma mais pronunciada o fosfato precipitado. Em um solo como LVdf, com alto teor de MO e alta capacidade de reserva de P, o FP1 pode ser utilizado pois possui capacidade de fornecer P. Já em solos como o LVd, o FP2 foi insuficiente em repor o P da solução de forma a suprir a necessidade da cultura.

4.2.1.4 Espectroscopia de alta resolução da borda de absorção (XANES - X-ray absorption near edge structure)

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam alguns dos espectros dos padrões utilizados no ajuste de combinação linear. Pode-se observar que nos padrões onde o P está adsorvido ao Fe (Figura 17) há picos menos intensos em relação aos espectros dos padrões de P associado ao Al (Figura 18), os quais apresentaram picos mais finos e intensos, sem nenhum pico na região da pré-borda de absorção.

A presença de pré-borda de absorção nos fosfatos de Fe e sua ausência nos fosfatos de Al foi comprovada por Khare *et al.* (2004), quando após misturarem ferridrita e boemita na proporção de 1:1, obtiveram um espectro que evidenciou a observação anterior, comprovando a capacidade da técnica em diferenciar os tratamentos.

Figura 17. Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está associado ao Fe e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.

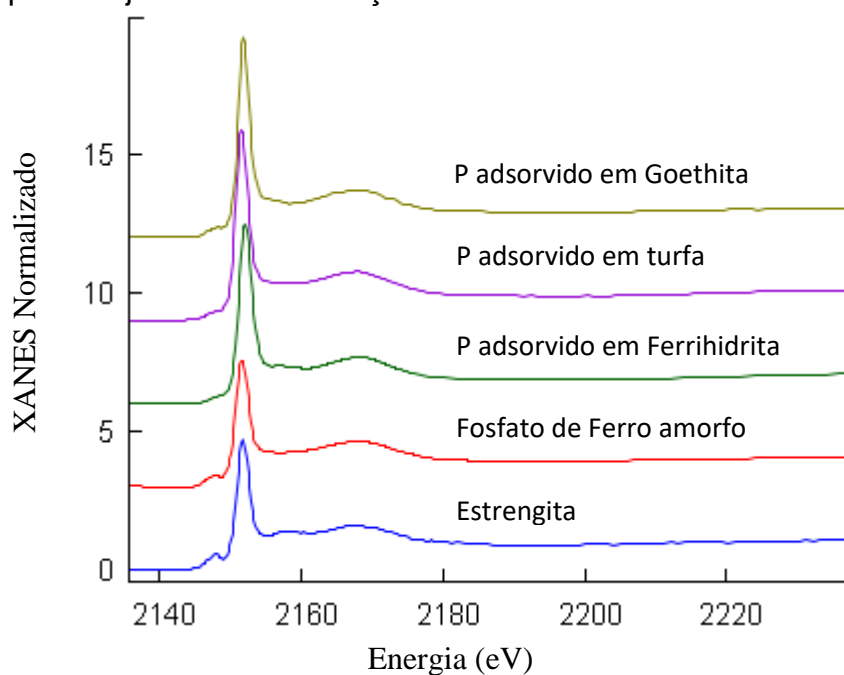
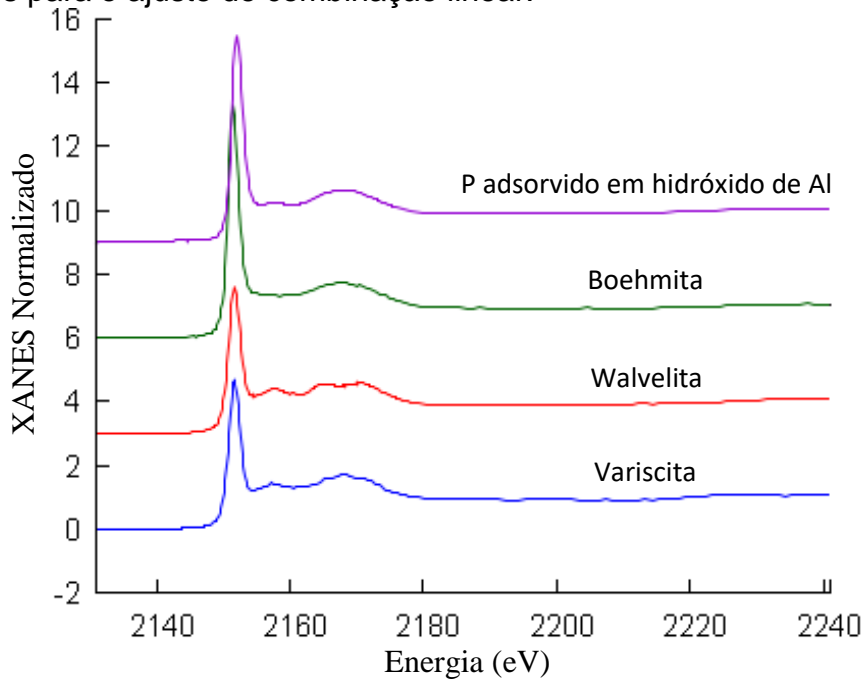


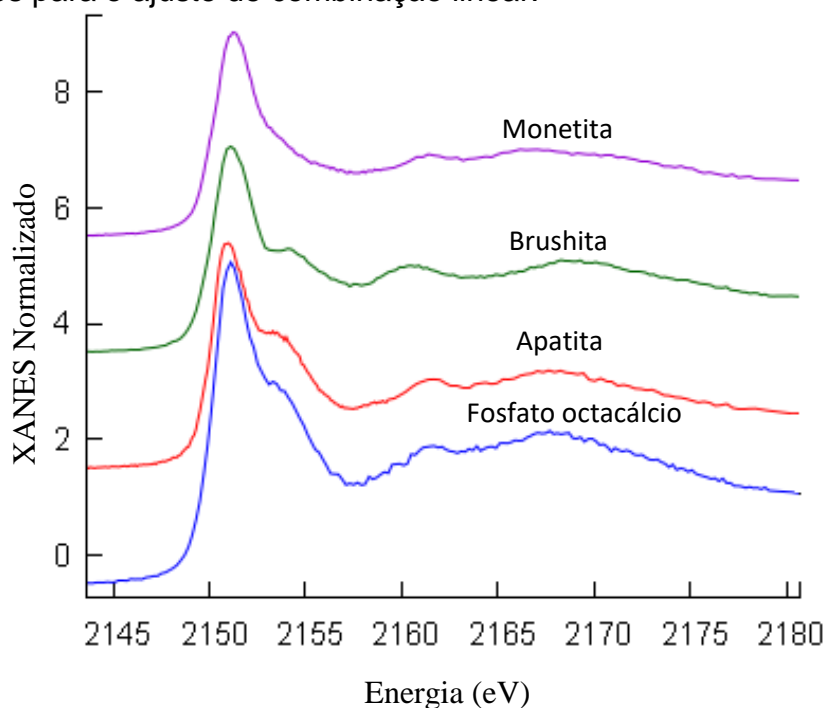
Figura 18. Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está associado ao Al e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.



Quando o P está associado ao Ca (Figura 19), os espectros dos padrões apresentam picos menos intensos que os do P-Al, porém com a intensidade próxima aos espectros do P-Fe. Além disso, a presença de um ombro (shoulder) é uma feição comum a esses espectros.

É possível identificar uma feição muito comum nesse tipo de espectro, conhecida como ombro (shoulder) na região de pós-borda de absorção. Nos espectros de apatita e fosfato octacálcio essa feição se apresentou de forma mais destacada, enquanto na monetita e brushita não foi possível notar tal forma. Essa característica do espectro do P-Ca é diminuída a medida que a solubilidade do mineral aumenta (HESTERBERG, 2010).

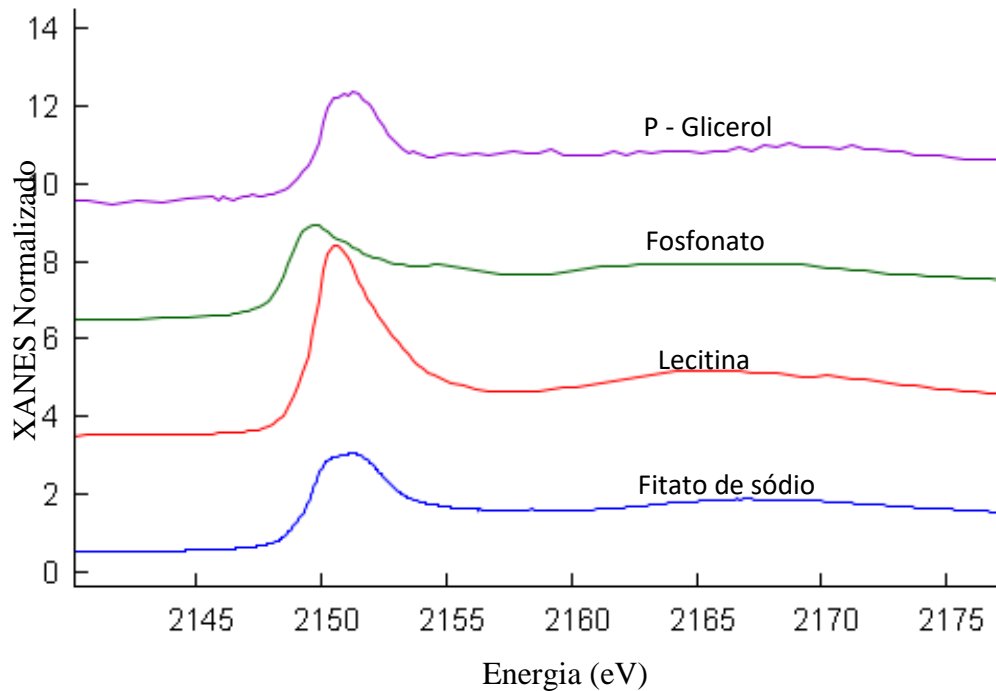
Figura 19. Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está associado ao Ca e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.



Na Figura 20 são apresentados alguns padrões em que o P está presente em compostos orgânicos. Nota-se que apresentam características distintas entre si, como picos mais proeminentes na Lecitina, do que no fosfonato e fitato de sódio, além de feição de pós-borda de absorção no fosfonato.

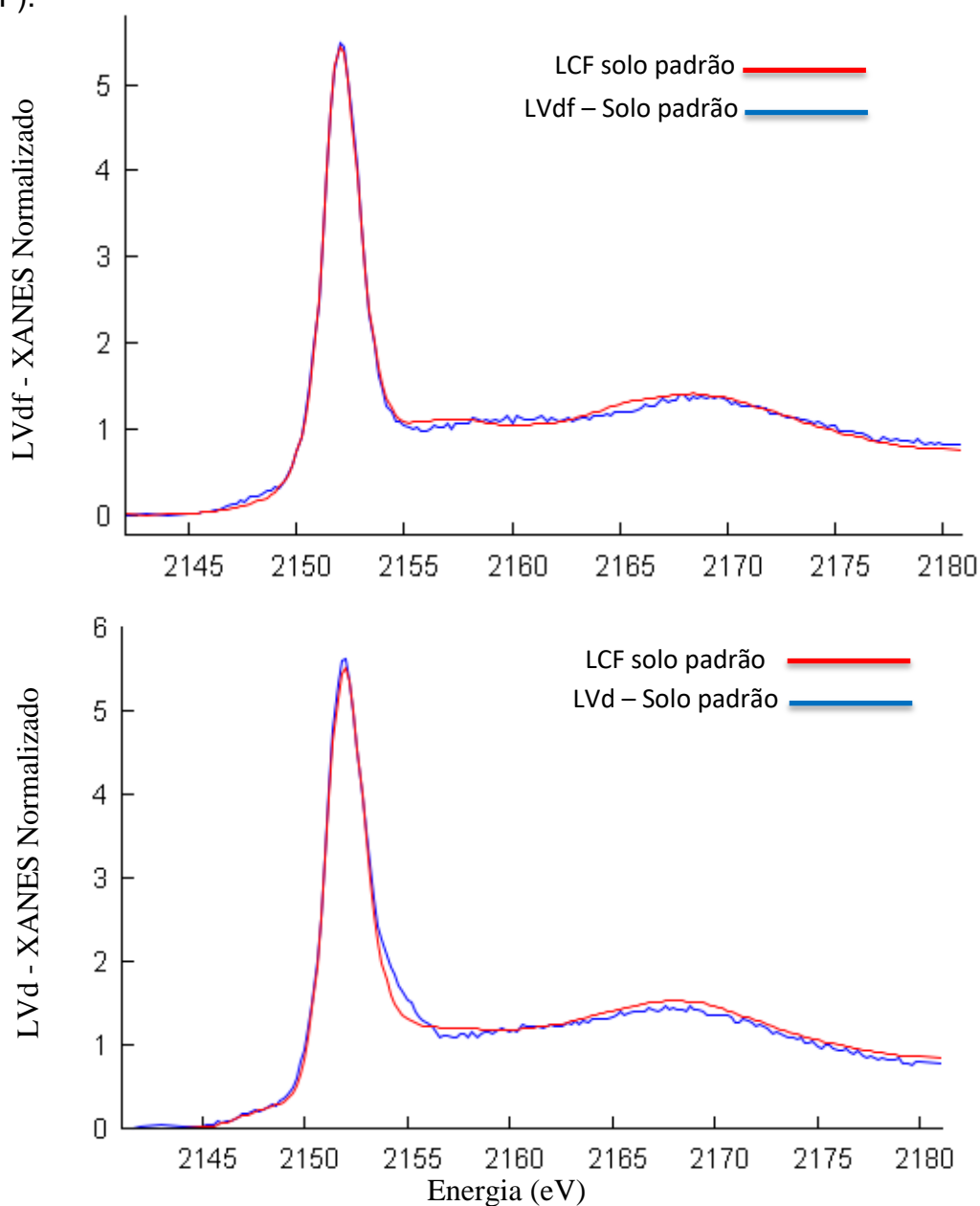
Os espectros dos solos antes do recebimento dos tratamentos e com os respectivos ajustes da combinação linear estão apresentados na Figura 23. Embora a literatura cite que algumas limitações, como baixa concentração de P e alteração da amostra devido a mudanças induzidas pelo feixe de raio-X, podem resultar em espectros ruidosos e de difícil análise (SEITER *et al.*, 2008), tal comportamento não foi identificado na maioria das amostras deste estudo, mesmo sob baixo teor de P (5 e 4 mg dm⁻³, LVdf e LVd, respectivamente), uma vez que um número maior de repetição de varreduras (scans) foi utilizado, totalizando 12 por amostra.

Figura 20. Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P dos padrões em que está em formas orgânicas e que foram utilizados para o ajuste de combinação linear.



Observou-se que no LVdf (Tabela 16) a associação do P ao Al deu-se de forma mais relevante frente ao Fe. Comprovando a mineralogia do LVdf, o ajuste linear deste solo demonstrou, originalmente, maior presença de P ligado a hidróxidos de Al (50%) e a goethita (26%), além de incipiente presença de P associado a lecitina, no entanto este com pouco peso no ajuste, podendo ser desconsiderado. A fração argila deste solo apresenta, em amostras isentas de Fe livre, os valores extremos de 60 a 79% de caulinita, 13 a 20% de gibbsita e 0 a 12 % de alofana, foram ainda diagnosticada as presenças de vermiculita (pouca) e ilita (incipiente) (SOUZA, 1973). No entanto, na fração grosseira predomina a magnetita (Fe_3O_4).

Figura 21. Espectros normalizados de alta resolução da borda de absorção (XANES) obtidos na camada K do P em um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) o seu respectivo ajuste de combinação linear (LCF).



No LVdf, a ocorrência da goethita pode ser explicada devido ao conteúdo de matéria orgânica, médio a alto, promover a complexação do Fe liberado pelo intemperismo, inibindo a formação de ferrihidrita, um precursor da hematita, favorecendo assim, a formação de goethita (KER, 1997).

Já o solo LVd (Tabela 17) apresentou maior associação do P a compostos de Fe, como ferrihidrita (28%) e goethita (54%), não apresentando correspondência do espectro com os padrões de Al utilizados no ajuste da combinação linear.

Os ajustes de combinações lineares referentes ao LVdf após as coberturas de solo e a soja são apresentados na Tabela 19. Na presença das coberturas com o SFT observou-se a predominância de formas de P associado ao Fe e ao solo padrão. No ajuste do solo com braquiária, prevaleceu o ajuste com o solo padrão (74%), o qual possui, segundo o ajuste, maior quantidade de P associado ao Al. Na presença do sorgo na ausência de plantas de coberturas, ocorreu o contrário.

Tabela 16. Distribuição relativa do fósforo estimada por meio do ajuste de combinação linear (LCF) em um Latossolo Vermelho distroférico após o cultivo de coberturas do solo (1) e de soja (2).

AMOTRA		FATOR R	X ²	SSP	P-Al	P-Fe	P-Ca	SP	P-ORG
Solo padrão		0,003	0,63	0,828	50	26	-	-	0,6
SFT									
Braquiária	1	0,0008	0,146	0,953	3	16	-	74	
	2	0,0008	0,145	0,958	-	17	-	76	0,1
Sorgo	1	0,007	3,37	1,294	-	100	-	29	-
	2	0,0008	0,15	0,952	0,4	16	-	75	-
Ausência de planta	1	0,008	3,7	1,207	-	88	-	32	0,5
	2	0,002	0,31	0,942	0,5	15	-	73	-
Fosfato Reativo									
Braquiária	1	0,008	3,4	1,229	-	105	-	-	16
	2	0,002	0,28	0,931	20	-	-	60	12
Sorgo	1	0,017	2,81	0,876	-	59	-	-	27
	2	0,0017	0,27	0,969	-	12	11	73	-
Ausência de planta	1	0,014	5,8	1,253	-	87	-	-	26
	2	0,0016	0,26	0,943	-	15	-	72	0,7
Fosfato Precipitado 1									
Braquiária	1	0,006	2,3	1,167	-	95	-	-	21
	2	0,001	0,24	0,943	0,7	-	13	73	-
Sorgo	1	0,009	3,6	1,262	-	99	-	-	26
	2	0,002	0,27	0,942	-	0,9	18	66	-
Ausência de planta	1	0,004	2,31	1,159	-	92	-	-	23
	2	0,001	0,25	0,901	19	11	11	49	-

P-Al: fósforo associado ao alumínio; P-Fe: fósforo associado ao ferro; P-Ca: fósforo associado ao cálcio; P-orgânico: fósforo em formas orgânicas; Fator R: fator que indica a qualidade do ajuste; X²: indica a qualidade do ajuste; SSP: soma dos pesos dos padrões utilizados no ajuste de combinação linear (LCF).

Os ajustes para o LVdf com as fontes FR e FP1 para as coberturas (Tabela 16), também apresentaram maior peso ao P-Fe, no entanto, a colaboração de padrões de P associado a compostos orgânicos nos ajustes demonstrou ser maior, não mais considerando o solo padrão. Embora a análise com XANES seja capaz de discriminar as associações das frações de P com diferentes metais, não consegue

discriminar com acurácia a absorção de P com certos minerais e com a matéria orgânica, porque estas espécies de P tem a energia dos espectros muito similares (PEAK *et al.*, 2002), logo a qualidade do ajuste (X^2) fica prejudicada, o que nota-se nos ajustes com P-orgânico frente as fontes acima citadas.

A associação do P a compostos com Ca no LVdf (Tabela 16) aparece nos ajustes com o sorgo e FR e, em todas as coberturas com o FP1, sempre associada ao ajuste com o solo padrão nesta última fonte de P. Ainda neste solo, observou-se que o uso das fontes FR e FP1, apresentaram maiores contribuições nos ajustes do P associado a compostos orgânicos, do que o SFT.

Após a cultura da soja (Tabela 16), os ajustes demonstraram a maior participação solos padrões, evidenciando o maior compartimento como o P-Al, além de P-Fe. Sob as fontes FR e FP1 os ajustes inferem a presença de P-Ca de forma considerável.

No tratamento ausência de planta houve uma grande diminuição da participação do P-Fe após o cultivo da cultura da soja, onde sob as fontes SFT e FP1 houve incremento da participação do P-Al e aos solos padrões, assim como do P-Ca com FP1.

Na Tabela 17 pode-se observar os ajustes de combinação linear do LVd, onde, da mesma forma que no LVdf, os padrões de P-Ca não tiveram peso nos ajustes dos tratamentos com SFT, assim como obteve o mesmo comportamento dos padrões de P-Fe e SP. Para a fonte FP2, houve a inversão do comportamento dos padrões nos ajustes, nos quais, tanto após as coberturas do solo como após a soja, braquiária e sorgo obtiveram maiores pesos nos ajustes de P-Al e P-Ca, além do solo padrão. Na ausência das coberturas, não foi observado P associado a Al, apenas com Fe, Ca e alguns compostos orgânicos, já após o cultivo da soja, neste mesmo tratamento, o P-Al assume como maior peso (34%), seguido pelo P-Ca e solo padrão.

Dos ajustes realizados nos tratamentos com FR no LVd (Tabela 17) após o cultivo das coberturas, somente se tem confiança nos resultados daqueles com braquiária, uma vez que com as demais coberturas (sorgo e ausência de plantas) a qualidade dos ajustes ficou comprometida (X^2 muito elevado), em virtude das amostras terem apresentado muito ruído, em vista da baixa concentração de P na amostra. Esse resultado indica que a concentração de P da amostra é um fator que poderia limitar a aplicação da técnica XANES em solos altamente desenvolvidos e

naturalmente pobres em P, no ambiente tropical. Porém, o constante e rápido desenvolvimento que a técnica vem sofrendo nos últimos anos como, por exemplo, no sistema de detecção, tem reduzido essa limitação e permitido que as análises sejam realizadas com razoável sucesso (SOUZA FILHO, 2014).

Tabela 17. Distribuição relativa do fósforo estimada por meio do ajuste de combinação linear (LCF) em um Latossolo Vermelho distrófico após o cultivo de coberturas do solo (1) e de soja (2).

AMOTRA	FATOR R	X ²	SSP	P-Al	P-Fe	P-Ca	SP	P-ORG
Solo padrão	0,008	1,62	0,903	-	82	0,7	-	-
SFT								
Braquiária	1	0,004	1,81	1,242	-	86	-	38
	2	0,002	0,28	0,864	46	12	-	15
Sorgo	1	0,006	2,6	1,232	-	87	-	26
	2	0,002	0,34	0,859	46	13	-	14
Ausência de planta	1	0,01	4,9	1,352	-	85	-	42
	2	0,002	0,3	0,876	45	13	-	18
Fosfato Reativo								
Braquiária	1	0,01	3,41	1,38	-	25	-	100
	2	0,002	0,36	0,883	44	-	0,9	34
Sorgo	1	0,02	17,42	1,71	82	-	-	79
	2	0,002	0,35	0,882	46	-	0,9	32
Ausência de planta	1	0,15	171	1,671	89	-	-	69
	2	0,01	1,06	0,818	45	0,7	29	-
Fosfato Precipitado 2								
Braquiária	1	0,017	2,18	1,379	58	-	38	41
	2	0,003	0,51	0,87	33	-	25	29
Sorgo	1	0,014	5,6	1,366	54	-	39	43
	2	0,003	0,46	0,912	19	-	19	52
Ausência de planta	1	0,009	3,02	1,233	-	76	25	-
	2	0,005	0,67	0,873	34	-	27	26

P-Al: fósforo associado ao alumínio; P-Fe: fósforo associado ao ferro; P-Ca: fósforo associado ao cálcio; P-orgânico: fósforo em formas orgânicas; Fator R: fator que indica a qualidade do ajuste; X²: indica a qualidade do ajuste; SSP: soma dos pesos dos padrões utilizados no ajuste de combinação linear (LCF).

Embora os solos não tenham apresentado o P associado ao Ca nos padrões, ou seja, no solo antes da aplicação da calagem-silicatagem e da adição dos fertilizantes, após estes tratamentos serem aplicados, pode-se observar aumento no peso dos padrões de Ca nos solos. Assim como encontrado por Khatiwada *et al.* (2012), que ao avaliar formas de P em solos ácidos em cultivo mínimo por mais de 10 anos, verificaram que o P-Al e o P-Fe corresponderam a 100 % do P do solo no

tratamento controle, porém, após a aplicação de fertilizantes fosfatados houve também aumento no P-Ca.

De forma geral, não foram observados picos na região da pré-borda de absorção, em ambos os solos após a cultura da soja. Porém, após o cultivo das coberturas do solo, no LVdf e no tratamento SFT do LVd, houve detecção de picos na pré-borda. A não detecção desse pico indica que há predominância de P associado ao Fe em estágio de oxidação +2 e que a associação do P com o Fe está mais relacionada a fenômenos de adsorção do que a precipitação (SOUZA FILHO, 2014).

4.2.2 Considerações finais

O comportamento dos teores de Ca, Mg e K na primeira fase do estudo não se mostrou sincronizado com os valores de CTC, mas sim com a SB. Já no segundo experimento (Figuras 14-A e 14-B) pode-se observar o sincronismo dos resultados de Ca, SB, CTC e pH sob o tratamento com o fosfato precipitado (FP1 e FP2). Estas fontes de P possuem expressivos teores de Ca, os quais podem ter auxiliado no aumento do teor de Ca nos solos estudados. Além disso, a CTC utilizada neste estudo foi calculada tendo como base a soma dos teores dos cátions básicos e acidez trocável, para a qual as amostras permanecem em agitação por 16 horas, podendo neste período ter havido dessorção de cátions básicos, superestimando o cálculo da CTC.

Esperava-se que o acréscimo de carbono orgânico pelo resíduo de plantas, especialmente no segundo experimento promovesse maiores alterações nos valores da CTC, o que não foi verificado. Porém, em algumas situações a CTC pode ser melhor explicada em razão das variações de pH do que pelo acréscimo de carbono orgânico e da adição de Ca e Mg pelos resíduos (NASCIMENTO *et al.*, 2004), especialmente em estudos de curta duração.

Em ambos os solos, todos os tratamentos apresentaram os teores de macronutrientes abaixo do nível crítico estabelecido para a soja (MALAVOLTA, 2006) e para o milho (BÜLL, 1993).

As fontes têm comportamentos diferentes frente aos corretivos quanto às frações do P inorgânico nos solos estudados. De modo geral, em ambos os solos, os maiores compartimentos de P estão representados nas frações P-Al e P-Fe, provavelmente devido a sua mineralogia, na qual o P se coordena com Fe e Al dos óxidos e na superfície da caulinita com energia moderada (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001).

5 CONCLUSÕES

Todos os corretivos, calcário e escória, inclusive a composição dos mesmos, promoveram a correção da acidez dos solos estudados, além de aumentar os teores dos cátions básicos.

As fontes alternativas de P, FP1 e FP2, proporcionaram fornecimento de P para os solos muito próximos ou não diferentes dos patamares da fonte padrão, SFT, inferindo que podem ser utilizadas como fonte de P para os solos estudados.

O uso de plantas de cobertura do solo, *Braquiária decumbens* e *Sorghum bicolor*, não promoveu efeitos nos teores de macronutrientes e micronutrientes nos solos estudados.

Os espectros de XANES mostraram ser apropriados para a distinção de formas de P nos solos estudados, através das feições específicas em cada padrão. Mesmo avaliando apenas o estado mineralógico por este método, na condição deste estudo, obtendo-se diferenças em função dos tratamentos aplicados.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, D.B. et al. Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 119, p. 504-514, 2015.
- AJIBOYE, B., AKINREMI, O.O.; JURGENSEN, A. Experimental Validation of Quantitative XANES Analysis for Phosphorus Speciation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.71, p. 1288–1291, 2007.
- ALBUQUERQUE, U.P. The use of medicinal plants by the cultural descendants of African people in Brazil. **Acta Farmacéutica Bonaerense**, Buenos Aires, v.20, p. 139-144, 2001.
- ALCÂNTARA F.A. et al. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.277-288, 2000.
- ALCARDE, J. C. **Corretivo de acidez do solo: características e interpretações**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992. (Boletim técnico, 6).
- ALCARDE, J.A.; RODELLA, A.A. **Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos**. In: CURTI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A. S.; ALVARES V., V.H. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, Sociedade brasileira de Ciência do Solo, p.291-334, 2003.
- ALMEIDA, J.A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas de 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.
- ALVAREZ, V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa, MG: SBCS; UFV, p.615-646, 1996.
- ALVES, V.M.C. et al. **Exudação de ácidos orgânicos como mecanismo de tolerância a alumínio em milho**. Anais do XXIII Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 2000.
- ANDERSON, D.L.; JONES, D.B.; SNYDER, G.H. Response of a rice-surgarcane rotation to calcium silicate slag on everglades histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v.79, p.531-535, 1987.
- BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M. Fósforo Latossolo do Estado de Minas Gerais - II: quantidade de fósforo disponível. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 22, n. 119, p. 50-61, 1975.
- BALDEON, J. R. M. **Efeito da ação alcalinizante e da competição entre silicato e fosfato na eficiência do termofosfato magnésiano em solos ácidos**. 1995. 85 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)–Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2.ed. New York: John Wiley, 414p. 1995.

BASHAN, Y.; HOLGUIN, G. Azospirillum – plant relationships: environmental and physiological advances (1990-1996). **Canadian Journal of Microbiology**, Guelph, v.43, p.103-121, 1997.

BEAUCHEMIN, S. et al. Speciation of phosphorus in phosphorus-enriched agricultural soils using X-ray absorption near-edge structure spectroscopy and chemical fractionation. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 32, n. 5, p. 1809-1819, 2003.

BELTRÁN, R.R. & SILVEIRA, R.I. & PASSOS, M.J. Disponibilidade de fósforo para plantas de arroz avaliada por extratores químicos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, n.2, p.233-241, 1998.

BENEDITO, D.S. **Eficiência agrônômica de fontes alternativas de fósforo e modelo de predição do uso de fosfatos naturais**. 2007. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba 2007.

BIANCO, S., TONHÃO, M.A.R. e PITELLI, R.A. Crescimento e nutrição mineral de capim-braquiária. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 423-428, 2005.

BRAZ, A.J.B.P. et al. Acumulação de nutrientes em folhas de milho e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p. 83-87, 2004.

BÜLL, L. T. **Nutrição mineral do milho**. In: BÜLL, L. T.; CANTARELA, H. (Ed.). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fostato, p. 63-145, 1993.

CAIONE, G. et al. Fontes de fósforo para adubação de cana-de-açúcar forrageira no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 66-73, 2011.

CAIRES, E.F.; ROSOLEM, C.A. Correção da acidez do solo e desenvolvimento do sistema radicular do amendoim em função da calagem. **Bragantia**, Campinas, v. 57, 1998.

CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 99-108, 2005.

CAMPELLO, M.R.; NOVAIS, R.F.; FERNANDEZ, I.E.R.; FONTES, M.P.F. & BARROS, N.F. Avaliação da reversibilidade de fósforo não-lábil para lábil em solos com diferentes características. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, p.157-165, 1994.

CARNEIRO, Leandro Flávio et al. Frações de fósforo no solo em resposta à adubação fosfatada em um Latossolo com diferentes históricos de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 483-491, 2011.

CARVALHO, R. et al. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 69-74, 2000.

CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1213-1218, 2004.

CASAGRANDE, J.C. et al. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.51- 57, 2003.

CASTAGNARA, D.D. et al. Cultivo consorciado de soja com braquiária. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, p. 168-177, 2014.

CASTRO, G.S.A. **Atributos do solo decorrentes dos sistemas de produção e da aplicação superficial de corretivos**. 2012. 155f. Tese (Doutorado) Agricultura-Agronomia. Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2012.

CASTRO, G.S.A. **Atributos do solo decorrentes dos sistemas de produção e da aplicação superficial de corretivos**. 2012. 155 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2012.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, n. 1, p. 133-144, July 1957.

CHIODEROLI, C.A, et al. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, p.37-43. 2012b.

CHIODEROLI, C.A, et al. Consórcio de *Urochloas* com milho em sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, 1804-1808. 2012a.

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

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MARCELINO, R. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.9, p.1307-1317, 2007.

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.

CORRÊA, L.A; HAAG, H.P. Níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras em Latossolo Vermelho amarelo álico: II Experimento de campo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.50, p.109-116.1993.

COSTA, A. **Doses e modos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja-trigo em sistema de plantio direto**. 2000. 146p. Tese (Doutorado em Agronomia - Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2000.

COSTA, N.R, et al. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília. v.47, p.1038-1047. 2012.

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.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. **Adubação silicatada e estresse hídrico em batata**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 4., 2007, Botucatu. Resumos. Botucatu: Unesp, 2007. p. 218-221.

CRUSCIOL, C.A.C.; MORO, E.; LIMA, E. do V.; ANDREOTTI, M. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v.67, p.481-489, 2008.

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

DEUS, A.C.F. **Avaliação de eficiência relativa para a reatividade em silicatos**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2010.

DIAZ, J. et al. Marine polyphosphate: a key player in geologic phosphorus sequestration. **Science**, Amsterdam, v. 320, p. 652–655, 2008.

ECHER, F.R. et al. Crescimento inicial e absorção de nutrientes pelo algodoeiro cultivado sobre a palhada de *Brachiaria ruziziensis*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 783-790, 2012.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Londrina: Planta, 2006.

EVEBORN, D. et al. XANES speciation of P in environmental samples: An assessment of filter media for on-site wastewater treatment. **Environmental Science and Technology**, v. 43, p. 6515–652. 2009.

FAGERIA, N.K. **Adubação e calagem**. In: VIERIA, N.R.A.; SANTOS, A.B.; SANT’ANA, E.P. (Ed). A cultura do arroz no Brasil, Santo Antonio de Goiás: EMBRAPA-CNPAP, 1999. p.329-353.

FASSBENDER, H.W. **Química de suelos com énfasis em suelos de América Latina**. 2.ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperação para Agricultura, 1987. 420p.

FAVARIN, J. L.; MARINI, J. P. **Importância dos micronutrientes para a produção de grãos**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <<http://www.snagricultura.org.br/artigos/artitec-micronutrientes.htm>>. Acesso em: 25 mar. 2006.

FERNANDEZ, F.A. et al. Influência de silicato e calcário na decomposição de resíduos culturais e disponibilidade de nutrientes ao feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.935-945, 2009.

Ferreira, D. F. **Programa de análises estatísticas (statistical analysis software) e planejamento de experimentos – SISVAR 5.0 (Build 67)**. Lavras: DEX/UFLA, 2003.

FOX, R. L.; SEARLE, P. G. E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M. Diversity of soils in the tropics. **American Society of Agronomy**, Madison, p. 97-119. 1978.

FRANCHINI, J.C.; MEDA, A.R.; CASSIOLATO, M.E.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agricola**, Piracicaba, 58:357-360, 2001.

FRANCO, A.A.N. **Marcha de absorção e acúmulo de nutrientes na cultura do sorgo**. 2011, 74 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semi-Árido, Universidade Estadual de Montes Claros - Unimontes, Janaúba, 2011.

FRANZINI, V. P. **Desenvolvimento de métodos analíticos para a determinação da concentração de fosfito em fertilizantes**. 2009. 111 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, Araraquara, 2009.

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

GATIBONI, L.C.; et al. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, p. 283-290, 2003.

GIACOMINI S.J et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.1097-1104. 2003.

GONÇALVES, J.L.M. et al. Cinética da transformação de fósforo-lábil em não-lábil, em solos de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.13-24, 1989.

HAMMOND, J.P.; BROADLEY, M.R.; WHITE, P.J. Genetic responses to phosphorus deficiency. **Annals of Botany**, v. 94, p. 323–332, 2004.

HAYNES, R.J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, v. 37, p. 249-315, 1984.

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.

HERNANDEZ, R. J. M.; SILVEIRA, R. I. Efeitos da saturação por bases, relações Ca:Mg no Solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição

- mineral no Milho (*Zea mays* L.). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, n. 1, p. 79-85, 1998.
- HESTERBERG, D. L. et al. XAFS study of adsorbed and mineral forms of phosphate. **Journal of Synchrotron Radiation**, Malden, v.6, 636-638, 1999.
- HESTERBERG, D. **Macroscale chemical properties and x-ray absorption spectroscopy of soil phosphorus**. In: SINGH, B.; GRAFE, M. (Ed.). *Synchrotron based techniques in soils and sediments*. Amsterdam: Elsevier B.V., 2010. p. 313-356.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. **Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais**. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. *Fósforo na agricultura brasileira*. Piracicaba: Potafos, 2004. p.665-688.
- HUANG, R.; TANG, Y. Speciation dynamics of phosphorus during (hydro) thermal treatments of sewage sludge. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 24, p. 14466-14474, 2015.
- INGALL, E. D., et al. Phosphorus K-edge XANES spectroscopy of mineral standards. **Journal of Synchrotron Radiation**, Malden, n.18, p. 189-197, 2010.
- JANEGITZ, M.C.; INOUE, B.S.; ROSOLEM, C.A. Formas de fósforo no solo após o cultivo de braquiária e tremoço branco. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.43, n.8, p.1381-1386, 2013.
- KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Núcleo Regional Sul da Soc. Bras. de Ciência do Solo, Santa Maria - RS, Boletim Técnico No.3, 31pg. 1997.
- KELLY, S.D.; HESTERBERG, D.; RAVEL, B. Analysis of soil and minerals using x-ray absorption spectroscopy. In: ULERY, A.L.; DREES, L.R. (Ed.). *Methods of soil analysis*. **Soil Science Society of America**, Madison. p. 387-463. 2008.
- KER, J.C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.5, p. 17-40, 1997.
- KHARE, Nidhi et al. XANES determination of adsorbed phosphate distribution between ferrihydrite and boehmite in mixtures. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 2, p. 460-469, 2004.
- KHATIWADA, R. et al. Speciation of phosphorus in a fertilized, reduced-till soil system: In-field treatment incubation study. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, n. 6, p. 2006-2018, 2012.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicato de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: UFU/ICIAG, 2004. (Boletim técnico, 1).
- KRUSE, J. & LEINWEBER, P. Phosphorus in sequentially extracted fen peat soils: A K-edge X-ray absorption near-edge structure (XANES) spectroscopy study. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 171, p. 613–620, 2008.
- Kuo, S., 1996. **Phosphorus**. In: "Methods of soil analysis. Part 3 Chemical methods". In: Sparks D.L., (Ed). SSSA and ASA. Madison, W.I., pp. 869-920.

LACERDA, J.J.J. et al. Crop growth response and dynamics of inorganic phosphorus fractions after application of reactive Arad phosphate rock in Oxisol with different land use histories. **African Journal of Agricultural Research**, Nigeria, v. 8, n. 26, p. 3454-3461, 2013.

LACERDA, J.J.J. **Frações inorgânicas e disponibilidade de fósforo em Latossolos com diferentes mineralogia e histórico de uso, adubadas com fosfato reativo**. 2011. 82 f. Dissertação (Mestrado em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, Lavras: UFLA, 2011.

LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em latossolo roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. 1997. 87 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Lavras, 1997.

Léles, É.P. et al. Interação de doses de calcário e zinco nas características morfológicas e nos componentes de produção da mamoneira. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.32, n. 3, p. 501-509, 2010.

LIU, J.; et al. Complementary phosphorus speciation in agricultural soils by sequential fractionation, solution ³¹P nuclear magnetic resonance, and phosphorus K-edge Xray absorption near edge structure spectroscopy. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 42, n. 6, p. 1763-1770, 2013.

LOPES, A.S. et al. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 110 p. 2004.

LOPES, M.S. **Relações entre o pH e a adsorção de fósforo e silício em solos**. 1977. 45p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UFRGS, 1977.

LOPES, S. 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.; ADDALLA, S. R. S. SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 2004, Piracicaba. Anais...Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 13-34.

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

MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola: adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda., 596p. 1981.

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

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

MARTINAZZO, R. et al. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.563-570, 2007.

MARTINEZ, H.E.P.; CARVALHO, J.G. de.; SOUZA, R.B. de. **Diagnose foliar**. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.V.H. (eds.). **Recomendação**

para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação. Viçosa: Comissão de fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.143-168.

MELLO, J. V. de.; PEREZ, D. V. **Equilíbrio químico das reações do solo**. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. Química e mineralogia do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, 2009. p. 151-249.

MENDONÇA, V.Z. et al. Liberação de nutrientes da palhada de forrageiras consorciadas com milho e sucessão com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 39:183-193, 2015.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, Amnsterdam, v. 58, p. 107-123, 1993.

MEURER, E.J; ANGHINONI, I. **Fundamentos da Química do Solo**. Ed. Evangraf LTDA, 4ª Ed. 2010, Porto Alegre: 266 p.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. & FRANCHINI, J.C. **Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais**. Inf. Agron., 92:1-8, 2000. (Encarte Técnico).

MORAES, R.N. de S. **Decomposição das palhadas de sorgo e milheto, mineralização de nutrientes e seus efeitos no solo e na cultura do milho em plantio direto**. 2001. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

MOREIRA, J.F.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; LEAL, P.G.L. **Efeito do tempo de contato do fósforo com o solo sobre sua disponibilidade para mudas de eucalipto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.15, n.3, p. 303-308, 1991.

MOTTA, P. E. F. et al. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 349-359, 2002.

NAHAS, E. Microrganismos do solo produtores de fosfatases em diferentes sistemas agrícolas. **Bragantia**, Campinas, v.61, p.267-275, 2002.

NASCIMENTO, C. W. A.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C. Soil chemical alterations and growth of maize and bean plants after sewage sludge application. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 385-392, 2004.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impact of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, New York, v. 172, p. 305-325, 2009.

NOVAIS, R. F. et al. (Org.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

NOVAIS, R.F.; KAMPRATH, E.J. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, n.6, p. 931-935, 1978.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa - MG, 1999. 399p.

OLIBONE, D. et al. **Crescimento inicial da soja sob efeito de resíduos de sorgo**. *Planta daninha* [online]. 2006, vol.24, n.2 pp.255-261.2006.

OLIVEIRA, T.K.; CARVALHO, G.J; MORAES, R.N.S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1079-87. 2002.

OSÓRIO FILHO, B.D. et al. Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, p.712-719, 2007.

OXMANN, J.F., SCHWENDENMANN, L., LARA, R.J. Interactions among phosphorus, pH and Eh in reforested mangroves, Vietnam: a three-dimensional spatial analysis. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v.96, p.73-85, 2009.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.30, p.1-42, 1978.

PARIZ, C.M. et al. Straw decomposition of nitrogen-fertilized grasses intercropped with irrigated maize in an integrated crop-livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.2029-37. 2011.

PATRICK JUNIOR, W.H.; MAHAPATRA, I.C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.20, p.323-359, 1968.

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Nutrient availability in soil: decomposition and liberation of organic compounds from plant residues. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p. 911-920, 2008.

PEAK, D., SIMS, J. T. & SPARKS, D. L. Solid-State Speciation of Natural and Alum-Amended Poultry Litter Using XANES Spectroscopy. **Environmental Science of Technology**, v.36, p.4253–4261, 2002.

PEREIRA, H.S.; VITTI, G.C.; KORNDORFER, G.H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.101-108, 2003.

PLESE, L.P.M. et al. Efeitos das aplicações de cálcio e de boro na ocorrência de podridão apical e produção de tomate em estufa. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55(1), p.144-148, 1998.

POZZA, A.A.A. et al. Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsita pedogenética. **Química Nova**, São Paulo, v.32, p. 99-105, 2009.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F.M. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo na soqueira da canade-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.287- 296, 2003.

- PRADO, R. de M.; FERNANDES, F.M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.57, p.739-744, 2000.
- PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; ROQUE, C. G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 83- 90, 2001.
- PRADO, R.M. et al. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002.
- PRADO, R.M., NATALE, W. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento do sistema radicular da goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 10, p.1007- 1012, 2004.
- PREZOTTI, Luiz Carlos; MARTINS, André Guarçoni. Efeito da escória de siderurgia na química do solo e na absorção de nutrientes e metais pesados pela cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa , v. 59, n. 4, p. 530-536, Aug. 2012 .
- PRIETZEL, J. et al. Synchrotron-based P K-edge XANES spectroscopy reveals rapid changes of phosphorus speciation in the topsoil of two glacier foreland chronosequences. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 108, p. 154-171, 2013.
- PROCHNOW, L. I. et al. Characterization and agronomic evaluation of single superphosphates varying in iron phosphate impurities. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p.293-302, 2003.
- QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. 111p.
- RAIJ, B. V. et al. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, Fundação IAC, 1997. 285 p.
- RAIJ, B. V. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAIJ, B.V. **Fósforo no solo e interação com outros elementos**. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S., eds. Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba, Potafos, 2004. p.106- 114.
- RANNO, S.K.; SILVA, L.S. & MALLMANN, F.J.K. Fracionamento do fósforo inorgânico em solos de várzea do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.13, p.47-54, 2007.
- Ravel, B. and Newville, M. ATHENA, ARTEMIS, HEPHAESTUS: Data Analysis for X-Ray Absorption Spectroscopy Using IFEFFIT. **Journal of Synchrotron Radiation**, Malden, v.12, p. 537-541, 2005.
- 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.

REIS JUNIOR, F.B. et al. Identificação de isolados de *Azospirillum amazonense* associados a *Brachiaria* spp., em diferentes épocas e condições de cultivo e produção de fitormônio pela bactéria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.03-113, 2004.

REIS, T.H.P. **Dinâmica e disponibilidade de fósforo em solos cultivados com café em produção**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, 2009. Lavras: UFLA, 2009. 114p.

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

RHEINHEIMER, D. et al. **Fósforo orgânico do solo**. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, 1999, p. 227-244.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.345- 354, 2000.

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

RODRIGUES, C.R. et al. Crescimento e acúmulo de fósforo pela soja cultivada em sucessão a diferentes gramíneas forrageiras adubadas com super fosfato triplo e fosfato reativo de Arad. **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 33, n. 6, p. 1486-1494, 2009.

ROLIM Neto, F. C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.953-964, 2004.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palhada de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 355-362, 2003.

ROSOLEM, C.A. et al. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 1033-1040, 2006.

SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. Transformations of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p. 62-67, 1986.

SALTON, J. C. **Opções de safrinha para agregação de renda nos Cerrados**. In: ENCONTRO REGIONAL DE PLANTIO DIRETO NO CERRADO, 4, 1999, Uberlândia. Plantio direto na integração lavoura-pecuária. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. p. 189-200.

- SANCHEZ, P.A.; LOGAN, T.J. **Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics**. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A. (Ed.). Myths and science of soil of the tropics. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p.35-46. (Special Publication, 29).
- SANDIM, A.S. **Solubilidade, efeito residual e eficiência agronômica de fontes alternativas de fosfatos**. 2016, 150 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016.
- SANTOS, D.R. **Propriedades químicas do solo**. In: Fundamentos da Ciência do solo. REICHERT, J.M. (Ed). UFSM, Santa Maria. Apostila.
- SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.2, p.576-586, 2008.
- SANTOS, J.Z.L. et al. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.705-714, 2008.
- SANYAL, S. K.; DE DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformation in soil. **Advances in Soil Science**, New York, v.16, p.1-120, 1991.
- SATO, S. et al. Phosphorus speciation in manure and manure-amended soils using XANES spectroscopy. **Environmental Science and Technology**, v.39, p.7485-7491, 2005.
- SCHAEFER, C.E.G.R.; GILKES, R.J.; FERNANDES, R.B.A. Study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v.20, p.1-33, 2003.
- SEITER, J. M. et al. XANES spectroscopic analysis of phosphorus speciation in alum-amended poultry litter. **Journal of Environmental Quality**, v.37, 477-485. 2008.
- SILVA NETO, L.F. et al. Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1873-1881, 2008.
- SILVA, F.C. & RAIJ, B.van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p.267-288, 1999.
- SILVA, M.A. et al. Frações de fósforo em Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1197-1207, 2003.
- SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2002. 416p.
- SOUSA, D.M.G., REIN, T.A. & LOBATO, E. **Solubilidade e eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos avaliados com a cultura da soja em um Latossolo de Cerrado**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., Brasília, 2008.

SOUZA FILHO, L.F. **Formas de fósforo em Latossolo sob Cerrado em função do tempo de uso agrícola**. 2014. 127 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2014.

SOUZA, D.M G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. Adubos e adubações**. Disponível em: <<http://www.dpv24.iciag.ufu.br/new/dpv24/Apostilas/Anais%20do%20Djalma%20Marti%20nhao%2002.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2016.

SOUZA, J.L.G. **Estudo da fração argila da Terra Roza Estruturada do Município de Botucatu (SP) para fins de gênese e classificação de solos**. 1973. 73f. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu, 1973.

SOUZA, R.F. et al. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1535-1544, 2007.

SPAIN, J.M., SALINAS, J.G. **A reciclagem de nutrientes nas pastagens tropicais**. In: Anais da 16ª Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo; 1984; Ilhéus. Ilhéus: Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira; 1985. p.259-99.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. Academic: California, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TAKAHASHI, S.; ANWAR, M.R. Wheat yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of anual fertilizer application to an Andosol. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 101, n.2, p 160-171, 2007.

TECHIO, J.W. **Crescimento de milho em solução com alumínio e produção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular**. 2009. 106 f. Dissertação (Mestre em Agronomia – Área de concentração em Produção Vegetal) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009.

TEIXEIRA, N.T. **Ácidos húmicos disponibilizam fósforo para as plantas**. Disponível em: <http://www.revistacampoenegocios.com.br/acidos-humicos-disponibilizam-fosforo-para-as-plantas/>. Acesso em: 17 janeiro 2017.

TEMÁTICA SOBRE FERTILIZANTES EM IBEROAMÉRICA, 14., 2001, Santo Domingo. Palestra. Disponível em: <http://w3.cetem.gov.br/cyteciii/det_proyectosyredes.htm#proyectos>. Acesso em: 17 dezembro 2016.

TIESSEN, H.; MOIR, J.O. **Characterisation of available P by sequential extraction**. In: Carter, M.R.; Gregorich, E.G. (eds) Soil sampling and methods of analysis, 2nd. CRC, Boca Raton, 293–306. 2007.

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1609-1618, 2008.

VIDAL, A. A. de. **Disponibilidade de silício no solo afetada por diferentes níveis de pH e fósforo**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)–Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

VIDAL, A.A.; PRADO, R.M. Aplicação de escória siderúrgica, calcário e uréia em Latossolo cultivado com arroz. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 2, p. 264-272, 2011.

VITTI, G. C. **Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação dos citros**. In: MENTEN, J. O. M. Curso intensivo de citricultura. Piracicaba: AE/CEPES/ESALQ, 1991. p.53-67.

VITTI, G.C.; WIT, A.; FERNANDES, B.E.P. **Eficiência agrônômica dos termofosfatos e fosfatos alternativos**. In: SIMPÓSIO FÓSFORO NA AGRICULTURABRASILEIRA, 2003, São Pedro. Anais... São Pedro: Potafos; ANDA, 2003. 726p.

VIVIANI, C.A. et al. Disponibilidade de fósforo em dois Latossolos argiloso e seu acúmulo em plantas de soja, em função do aumento do pH. **Ciência Agrotecnica**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 61-67, 2010.

WALKER, T.W.; SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterdam, v.15, p.01-19, 1976.

WEBER, O. L. S.; et al. Cargas elétricas estruturais e variáveis de solos tropicais altamente intemperizados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 867-873, 2005.

WHALEN, J.K.; CHANG, C. Phosphorus sorption capacities of calcareous soils receiving cattle manure applications for 25 years. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.33, v.1011-1026, 2002.

WINSLON, M.D. Silicon, disease resistance, and yield of rice genotypes under upland cultural conditions. **Crop Science**, v.32, p.1208-1213, 1992.

WUTKE, A.C.P. & GARHANTINI, H. Avaliação da possibilidade de escórias de siderúrgica como corretivos de acidez dos solos. **Bragantia**, Campinas, v. 21, n.46, p. 795-805, 1962.

YAMADA, T.; LOPES, A. S. **Balço de nutrientes na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafós, 1998. (Informações agrônômicas, 84).