

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – IF GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO LENTA NA PRODUÇÃO
DE GRÃOS E NA SORÇÃO DE FÓSFORO NO SOLO

Autora: Vera Lúcia Quintino
Orientador: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues

Rio Verde – GO
Maio - 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – IF GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO LENTA NA PRODUÇÃO
DE GRÃOS E NA SORÇÃO DE FÓSFORO NO SOLO

Autora: Vera Lúcia Quintino
Orientador: Prof. DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues

Tese apresentada como parte das exigências para obtenção do título de DOUTORA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de concentração: Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde – GO
Maio – 2018

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Q
V473f Quintino, Vera Lúcia
Fertilizante de liberação lenta na produção de
grãos e na sorção de fósforo no solo / Vera Lúcia
Quintino; orientador Carlos Ribeiro Rodrigues. -- Rio
Verde, 2018.
59 p.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) --
Instituto Federal Goiano, Câmpus Rio Verde, 2018.

1. Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico. 2.
Monoamônio Fosfato. 3. Capacidade Máxima de Adsorção
de Fósforo. 4. depleção de fosfato. 5. fósforo
disponível. I. Rodrigues, Carlos Ribeiro, orient. II.
Título.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS-AGRONOMIA

FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO LENTA NA PRODUÇÃO
DE GRÃOS E NA SORÇÃO DE FÓSFORO NO SOLO

Autora: Vera Lúcia Quintino
Orientador: Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues

TITULAÇÃO: DOUTORA em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de
Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em 28 de maio de 2018.

Prof.^a Dra. Veridiana Cardozo Gonçalves Cantão
Avaliadora externa
UniRV – Rio Verde

Prof. Dr. Paulo Fernandes Boldrin
Avaliador externo
UniRV – Rio Verde

Dra. Tatiana Michlovská Rodrigues
Avaliadora interna
IF Goiano – Campus Rio Verde

Prof. Dr. Gustavo Castoldi
Avaliador interno
IF Goiano – Campus Rio Verde

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues
Presidente da banca
IF Goiano – Campus Rio Verde

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento eterno ao Professor Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues por compartilhar comigo conhecimentos em Química dos Solos, particularmente no estudo do Fósforo. Agradeço pela paciência, dedicação e tempo disponibilizado durante as etapas da pesquisa cuja contribuição valiosa lhe credita grande parte da conquista desse título.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde: GO representado por seus dirigentes e demais colaboradores, especialmente àqueles que concederam a permissão para que eu cursasse o Doutorado conciliado com o exercício de meu cargo de Técnica em Agropecuária, lotada no Setor de Laboratório de Ensino de Pequenos Animais, subordinado à Diretoria de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação desta Instituição.

Obrigada à Vanilda e à Angélica, secretárias do PPGCA – Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias e seus colaboradores, que sempre atenderam com profissionalismo minhas necessidades junto à secretaria do curso.

Ao PPGSS e PPGCA coordenados pelos Professores Dr. Osvaldo Resende e Dr. Frederico Antônio Loureiro, respectivamente, agradeço pela seriedade, competência e empenho junto às demandas do curso. Aos professores do Programa agradeço pelos ensinamentos valiosos e principalmente pelas perspectivas delineadas durante as aulas.

À Pró-reitora e Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação representadas pelo Pró-Reitor Professor Dr. Fabiano Silva Guimarães e o Diretor Professor Dr. Alan Carlos Costa, respectivamente pelo esforço árduo e constante no sentido de fomentar a oferta e promover o acesso aos cursos de pós-graduação no IFGoiano – RV, primando pela qualidade.

Aos meus colegas do Laboratório de Química Agrícola pela colaboração e companhia durante a realização do experimento tanto nas coletas quanto nas análises, obrigada a todos.

Agradeço aos professores que apoiaram a realização desse trabalho e de maneira especial aos professores membros da Banca Avaliadora que dispuseram conhecimento e tempo para contribuírem com a construção desta Tese.

A
ELE...:
DEUS, PAI;
À MÃE, MARIA;
À minha amada família;
Aos amigos de toda uma vida;
À professora das primeiras letras;
Aos professores do nível fundamental;
Aos professores do Magistério, todos eles;
Aos mestres das graduações e pós-graduações;
Aos avôs, dois pilares de sustentação: João e Inês,
Aos avôs pelo exemplo de amor: Galdino e Francisca;
Aos queridos filhos: Bruno Henrique e Karlos Eduardo;
Aos amados pais: João Quintino e Olívia Fischer de Carvalho;
Aos inesquecíveis irmãos Luiz, Nininho, Tino, Ana, Bia, Adelcio;
Ao Juliano, menino anjo, obrigado por existir e por nos ensinar tanto;
À Christiane, melhor amiga que alguém poderia ter. Coragem e superação.

Dedico e ofereço.

BIOGRAFIA DA ALUNA

Vera Lúcia Quintino nasceu em Ipuã – SP no dia 16/02/1964, filha de João Quintino e Olívia Fischer de Carvalho. Gradou-se em Licenciatura em Ciências Físicas e Biológicas em 1992 na Universidade Luterana do Brasil, Campus Itumbiara - GO. Coursou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias-AGRONOMIA em 2010/2012 no IFGoiano-Campus Rio Verde - Go. No ano de 2014 ingressou no doutorado do mesmo Programa na Área de concentração “Produção Vegetal Sustentável no Cerrado” na linha de Pesquisa das Tecnologias sustentáveis em sistemas de produção e uso do solo e água. Defendeu a tese em maio de 2018.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUÇÃO	16
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
OBJETIVOS	23
CAPÍTULO I -	24
Resumo.....	24
1.1 Introdução.....	26
1.2 Material e métodos.....	27
1.3 Resultados e discussão	29
1.4 Conclusões.....	35
1.5 Referências bibliográficas	35
CAPÍTULO II	39
Resumo.....	39
2.1 Introdução.....	43
2.2 Material e métodos.....	44
2.3 Resultados e discussão	46
2.4 Conclusões.....	55
2.5 Referências bibliográficas	55
CONCLUSÃO GERAL	59

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
Tabela 1 Caracterização química e textura do solo.....	27
Tabela 2 Equações lineares das isotermas de Langmuir e a capacidade máxima de adsorção de ânion fosfato (CMAP) (mg g^{-1}) em função de doses (kg ha^{-1}) e fontes de fósforo (MAP e MAPSR) em amostras de Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico após cultivo do sorgo safrinha 2015 e soja safra 2015/2016.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO I - EFEITO DO MONOAMÔNIO FOSFATO DE LIBERAÇÃO LENTA SOBRE A PRODUTIVIDADE DE SOJA E SORGO.....	24
Figura 1 Número de vagens por planta (A), peso de 1000 grãos (B), produtividade da soja cv. Intacta RR PRO2 M7110 (C) e (EF) eficiência de incremento de produção (D) em função de doses de fontes de fósforo MAP e MAPSR na safra 2014/2015.).**, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....	30
Figura 2 Produção de massa seca de panícula (MSP) (A), parte aérea (MSPA) (B) e total (MST) (C) (kg ha ⁻¹) e eficiência residual de incremento de produção (EF) (D) do sorgo cv. <i>Booster</i> cultivado em sucessão à soja em função de doses de fontes de fósforo MAP e MAPSR na safrinha 2015.**, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....	31
Figura 3 Peso de 1000 grãos (A), produtividade da soja cv. Intacta RR PRO2 M7110 (B) e eficiência de incremento de produção (EF) (C) em função de doses das fontes de fósforo MAP e MAPSR na safra 2015/2016.**, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....	32
Figura 4 Teores de fósforo (P) no solo (Mehlich I) na profundidade 0 a 0,05 m após safrinha 2015 e safra 2015/2016 em função das doses de fontes MAP e MAPSR.).**, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....	34
CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO COM USO DE FONTES DE LIBERAÇÃO LENTA.....	39
Figura 1 P remanescente (P _{rem}) (mg dm ⁻³) em função das doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) na profundidade de 0 a 0,05 m após safrinha 2015 (média do MAP e MAPSR) (A) e após a safra 2015/2016 para o MAPSR (B) e MAP (C).**, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....	47
Figura 2 Extração sequencial de P (Mehlich I) das amostras de 0 a 0,05 m de profundidade e nas diferentes doses de P ₂ O ₅ 0 (A), 54 (B), 108 (C), 162 (D), 216 (E) e	

270 (F) kg ha⁻¹ após a safrinha 2015 de sorgo forrageiro. **, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....48

Figura 3 Extração sequencial de P (Mehlich I) das amostras de 0 a 0,05 m de profundidade e nas diferentes doses de P₂O₅ 0 (A), 54 (B), 108 (C), 162 (D), 216 (E) e 270 (F) kg ha⁻¹ após a safra de soja 2015/2016. **, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....50

Figura 4 Correlação entre o P Mehlich I (mg dm⁻³) *versus* os teores de P remanescente (Prem) (mg dm⁻³) (A) e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) (mg g⁻¹) (B). **, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....53

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

Símbolo/Sigla	Significado
CMAP	Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo
EL	Energia de Ligação
pH	Potencial hidrogeniônico
Prem	Fósforo Remanescente
MAP	Monoamônio fosfato
MAPSR	Monoamônio fosfato <i>Slow Release</i> , (<i>de liberação lenta</i>)
°C	Graus Celsius
ha ⁻¹	Hectare
CNA	Citrato Neutro de Amônia
mm	Milímetros
mL	Mililitros
kg	Quilograma
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
P	Fósforo
mg	Miligrama
Ca ²⁺	Cálcio
Cmol _c	Centimol de carga
Fe	Ferro
Al ³⁺	Alumínio

Prof	Profundidade
g L^{-1}	Gramas por Litro
g	Gramas
L	Litro
H^+	Próton Hidrogênio
OH^-	Hidroxila
P_2O_5	Pentóxido de fósforo
kg ha^{-1}	Kilos por hectare
P1000	Peso de 1000 grãos
V	Saturação por bases
CV (%)	Coefficiente de variação
m	Saturação por Alumínio
NV	Número de vagens
MS	Matéria Seca
EU _F	Eficiência do Uso de Fertilizantes
EA	Eficiência Agronômica
EF	Eficiência do incremento de produção do Fertilizante
MSP	Massa Seca de Panícula
MSPA	Massa Seca de Parte Aérea
MST	Massa Seca Total
NH_3	Amônia
H_2PO_4^-	Anion fosfato
H_3PO_4	Ácido fosfórico
NH_4^+	Cátion Amônio
$\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Caulinita (filossilicato)
Fe_2O_3	Óxido de ferro (Hematita)
FeOOH	Oxihidróxido de ferro (Goethita)
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Hidróxido de Alumínio (gibbsita)

RESUMO

QUINTINO, VERA LÚCIA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, maio de 2018. **Fertilizante de liberação lenta na produção de grãos e na sorção de fósforo no solo.** Orientador: Professor DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues.

O fósforo (P) é um dos nutrientes de plantas mais estudado principalmente pela sua complexidade reativa no solo, baixa mobilidade e as suas fontes naturais finitas. A pesquisa envolvendo a tecnologia de fertilizantes de liberação lentavisaumentar a eficiência de uso do fósforo e tem se destacado após pesquisas previrem para as próximas décadas o crescimento de demanda por alimentos superior ao crescimento da produção agrícola. Um estudo foi conduzido durante dois anos com objetivo de avaliar a eficiência do Fosfato Monoamônico de liberação lenta (MAPSR) comparado ao Fosfato Monoamônico Convencional (MAP). O delineamento experimental com quatro blocos ao acaso e esquema fatorial 2 x 6 consistiu de duas fontes de fósforo (MAP e MAPSR) nas doses de 0; 54; 108; 162; 216 e 270 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico no IF Goiano Campus Rio Verde. Em seguida, as demais análises químicas somente foram realizadas na profundidade de 0,00-0,05 m em que houve variação significativa do P-rem em função dos tratamentos. No primeiro capítulo avaliou-se o efeito de doses de MAP e MAP de liberação lenta sobre a produtividade de soja e de sorgo e o efeito residual de P disponível no solo. Para tanto foram determinados os teores de fósforo disponível, o número de vagens, o peso de mil grãos e a eficiência de incremento de produtividade de soja e de sorgo cultivado em sucessão à soja e sem adubação fosfatada nas safras 2014/2015 e 2015/2016. No segundo capítulo por meio da quantificação do P-disponível (Mehlich 1) após extrações sucessivas estimou-se a depleção do fósforo e nas extrações com CaCl₂ 0,01mol L⁻¹ contendo 60 mg L⁻¹ de P com concentrações crescentes de fósforo determinou-se a capacidade máxima de adsorção (CMAP) utilizando diferentes ajustes do modelo de Langmuir ao final da safra 2014/2015 no primeiro ano de cultivo e da safra 2015/2016 no segundo ano. Com os resultados obtidos no presente trabalho e no capítulo 1 pode-se inferir que houve incremento de produção de grãos de soja nas safras 2014/2015 e 2015/2016 e de produção de panícula de sorgo na safrinha 2015 com a aplicação do MAPSR. Com a aplicação do MAPSR também foi obtido maior efeito residual do P disponível no solo. Os resultados obtidos no capítulo 2 com as extrações sucessivas

(Mehlich I) indicaram que os maiores valores dos componentes de produção vegetal obtidos com o uso do MAPSR podem ser atribuídos ao maior efeito residual dessa fonte comparada ao MAP, e esse efeito é intensificado quanto maior a dose de P_2O_5 . O MAPSR libera mais lentamente o anion fosfato que o MAP tradicional e há redução de adsorção de P no solo com a aplicação do MAPSR ao final de duas safras.

PALAVRAS-CHAVE: Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico, Monoamônio Fosfato, Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo; depleção de fosfato; fósforo disponível

ABSTRACT

QUINTINO, VERA LÚCIA. Goiano Federal Institute - Rio Verde Campus, May 2018.
Fertilizer of slow release in grain production and sorption of phosphorus in the soil. Advisor: Professor DSc. Carlos Ribeiro Rodrigues.

Phosphorus (P) is one of the most studied plant nutrients, mainly due to its reactive complexity in the soil, low mobility and its finite natural sources. The research involving slow release fertilizer technology aims to increase the phosphorus efficiency use and has stood out, after research foresee for the next decades the growth of demand for food, superior to the growth of agricultural production. A study was carried out over two years to evaluate the efficiency of the slow release Monoammonium Phosphate (MAPSR) compared to Conventional Monoammonium Phosphate (MAP). The experimental design with four randomized blocks and 2 x 6 factorial scheme consisted of two sources of phosphorus (MAP and MAPSR) in doses of 0; 54; 108; 162; 216 and 270 kg ha⁻¹ of P₂O₅ in Nitossolic Dystrophic Red Latosol at IFGoiano – Rio Verde Campus. Then, the other chemical analyzes were performed at a depth of 0.00-0.05 m where there was a significant variation of the P-rem as a function of treatments. In the first chapter, the effect of MAP and MAPSR doses on soybean and sorghum productivity and the residual P effect on soil were evaluated. For that, the levels of available phosphorus, the number of pods, the thousand grains weight and the productivity increase efficiency of soybean and sorghum grown in succession to soybean and without phosphate fertilization in the 2014/2015 and 2015 / 2016 crop. In the second chapter, by quantification of P-available (Mehlich 1) after successive extraction it was estimated the P depletion and in the extractions with CaCl₂ 0.01 mol.L⁻¹ containing 60 mg.L⁻¹ of P with increasing phosphorus concentrations, the maximum adsorption capacity (CMAP) was determined using different adjustments of Langmuir model at the end of the 2014/2015 crop in the first year of cultivation and in the 2015/2016 crop of the second year. With the results obtained in the present work and in chapter 1, it can be inferred that there was an increase in the soybeans production in the 2014/2015 and 2015/2016 crops and in the sorghum panicle production in 2015 off-season with the MAPSR application. With the MAPSR application, a higher residual effect of P in the soil was also obtained. The results obtained in chapter 2 with the successive extractions (Mehlich I) indicated that the highest values of the vegetal

production components obtained with the MAPSR use can be attributed to the greater residual effect of this source compared to the MAP, and this effect is intensified with higher P₂O₅ dose. MAPSR releases phosphate anion more slowly than traditional MAP and there is reduction of soil P adsorption with the MAPSR application at the end of two crops.

KEY WORDS: Nitossolic Dystrophic Red Latosol, Monoammonium Phosphate, Maximum Phosphorus Adsorption Capacity; phosphate depletion; phosphorus available.

INTRODUÇÃO

Devido à expansão da produção nos solos sob o bioma Cerrado, o Brasil adquiriu *status* de principal produtor agrícola global (SOUSA et al., 2014; MARIN, et al., 2016; LOPES & GUIMARÃES, 2016; WITHERS et al., 2018). Isso se deu porque até a década de 1960 a região dos cerrados era quase exclusivamente para produção pecuária extensiva em pastagens nativassem adição de adubos (SOUSA et al., 2014).

Grande parte das terras brasileiras cultivadas atualmente foram inseridas no processo produtivo por conversão de pastagens ou de cerrado nativo às custas de quantidades consideráveis de fertilizante fosfatado, haja vista que foram exploradas até à exaustão. Desde 1970 foi esse aumento rápido da expansão das terras sob cerrado e o uso de fertilizantes fosfatados que contribuíram para a revolução verde no Brasil (SOUSA et al., 2014, WITHERS, et al., 2018), embora seja do conhecimento geral que desde essa época a quantidade aplicada de fertilizantes é duas vezes a demanda da planta (WITHERS, et al., 2018).

A maioria deste fertilizante é aplicado especialmente nas culturas do milho, soja e cana-de-açúcar. Apenas cerca de 1,5% do consumo nacional de fertilizantes fosfatados é atribuído às pastagens (EBERHARDT et al., 2009; WITHERS, et al., 2018). Assim, as baixas doses de fertilizantes fosfatados em pastagem, gera deficit de P no solo. Quando há o uso de terras de pastagens para a produção de grãos há necessidade de utilizar grandes quantidades de fertilizantes fosfatados para superar o deficit entre entrada e saída de P durante os anos com pastagens deficientemente adubadas, além das perdas por adsorção e precipitação (SOUSA et al., 2014). Fato a ser considerado é o deficit ainda maior em áreas em que há dois cultivos por ano, com safra e safrinha, e na safrinha, em sua maioria, não é aplicado fertilizante fosfatado (WITHERS, et al., 2018). Além disso há grande variação regional na quantidade de P aplicada. Assim

enquanto a soja exporta cerca de 25 kg ha⁻¹ de P em solos subtropicais, como no estado do Paraná, no estado de Goiás a taxa de exportação média de P é 35 kg ha⁻¹ (WITHERS, et al., 2018).

As necessidades atuais de uso do P são supridas pelo fosfato das rochas ígneas clorofluorhidroxiapatitas, e sedimentares, fosforitas, sendo importado cerca de 60% do fertilizante fosfatado utilizado na agricultura brasileira (FIXEN, 2009; SOUSA et al., 2014). Isso se deve ao baixo custo do fertilizante fosfatado importado, principalmente o MAP proveniente da China, e ao alto custo de produção dos fosfatos acidulados oriundos das apatitas no Brasil. O continente Africano, em especial Marrocos e Saara Ocidental e a China detêm 66% das rochas fosfáticas do mundo, sendo 80% de rochas sedimentares (FIXEN, 2009).

Estimativas indicam que o esgotamento das reservas de P pode ocorrer ainda neste século se as atuais taxas de produção e demanda se mantiverem (SOUSA et al., 2014). O limite de exploração das rochas fosfáticas deve ocorrer em 2030, quando haverá declínio irreversível por falta de matéria-prima, e conseqüentemente com o aumento da demanda haverá também aumento do preço desde o processamento até venda dos fertilizantes (VACCARI, 2009; CORDELL, 2009). Todavia, íons fosfato não desaparecem dos sistemas na terra, semelhante ao que ocorre com recursos fósseis. Então, não se fala em perdas absolutas mas sim dissipativas de P, em função da baixa eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados (SCHOLZ et al., 2013; SCHOLZ & WELLMER, 2015).

A classe de solos sob o bioma Cerrado com maior uso para a produção de grãos é a classe dos Latossolos (SOUZA & LOBATO, 2004). O Latossolos, em geral, são altamente intemperizados, ácidos, ricos em alumínio trocável, com baixa disponibilidade de bases e alta capacidade de adsorção de fósforo à superfície de óxihidróxidos de ferro e de alumínio além de precipitação do P com Al e Fe em solução (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOARES & CASAGRANDE, 2009; VIEGAS et al., 2010; SOUZA et al., 2014).

Desta forma, para o cultivo nesses solos há grande demanda de corretivos e fertilizantes, principalmente fertilizante fosfatado, pois o P é o nutriente que mais limita a produção sob o cerrado (NOVAIS & SMYTH, 1999; NOVAIS et al., 2007; SOUSA et al., 2010). Em função da alta demanda e baixa eficiência de fertilizante fosfatado para cultivo sob o cerrado é importante além de um manejo do P mais eficiente, também a busca de novas tecnologias. Assim, a pesquisa envolvendo a tecnologia de liberação lenta visando aumentar a eficiência de uso de fertilizantes tem se reforçado após

inúmeras publicações sobre o esgotamento das reservas de fósforo nas próximas décadas (SOUSA et al., 2014; SCHOLZ & WELLMER, 2015; WITHERS, et al., 2018) com sérios riscos de comprometimento da segurança alimentar mundial.

Assim, o gerenciamento de recursos naturais do ponto de vista da perda e da eficiência de uso do fósforo é de interesse global (SOUSA et al., 2014). Nesse sentido, a relação entre perda, eficiência e eficácia deve ser considerada (SCHOLZ & WELLMER, 2015) sob a ótica da contribuição agronômica para tornar o fósforo mais eficiente na cadeia produtiva de alimentos e biomassas diversas com uso de fertilizantes fosfatados. Uma perda significa privação resultante de perder enquanto eficiência, nesse caso, significa se um determinado rendimento agrícola é produzido com quantidade baixa ou alta de fósforo (WEBSTER, 2014). A eficácia avalia se a aplicação de uma tecnologia ou programa produz o resultado que se espera. Em relação à fertilização com fósforo, por exemplo, a eficácia não apenas avalia o aumento ou a redução do rendimento atingido em um determinado ano, mas também os efeitos relacionados à sustentabilidade (SCHOLZ, 1996; WANG et al., 2015).

Reduzir a quantidade de perdas no uso de recursos significa aumentar a eficiência. As perdas são a diferença enquanto a eficiência é a razão entre a produção e a entrada (kg ha^{-1} de P) avaliadas (SCHOLZ & WELLMER, 2015). Sendo o fósforo essencial para a produção de alimentos para o mundo pode-se pensar que deve ser visto como um bem público a serviço da segurança alimentar (SCHOLZ & WELLMER, 2015). Quando aplicado ao solo o fertilizante fosfatado de liberação lenta é hidratado e (SHARMA, 1979; MACHADO & SOUZA, 2012) a difusão acontece lentamente até que as duas soluções se equilibrem ou fiquem isotônicas (NOVAIS et al., 2007; SOUSA et al., 2010) reduzindo as reações de sorção do P ao solo.

Em vista da extensão territorial e das características intrínsecas dos solos sob o Cerrado brasileiro em relação às reações de sorção, especialmente adsorção e precipitação do fósforo no solo surge a preocupação global com o manejo sustentável deste nutriente finito e insubstituível (SOARES; CASAGRANDE, 2009; NOVAIS et al., 2007; SOUSA et al., 2010; SCHOLZ & WELLMER, 2015; WITHERS, et al., 2018).

A adsorção pode ser representada por equações matemáticas ou isotermas que estimam a quantidade de massa da substância adsorvida (adsorvato) pelo sólido (adsorvente) e a concentração da substância na solução de equilíbrio, sem alteração de temperatura (BOSCOV, 2008, ALLEONI et al., 2009). Embora as isotermas não

esclareçam o tipo de mecanismo de sorção ocorrido no processo de retenção de determinado elemento pelo solo, por meio da correlação entre os parâmetros dos modelos de sorção e propriedades dos solos, sua descrição é facilitada (ALLEONI et al., 2009; NOVAIS, SCHULTHAIS & VIEGAS, 2010).

De forma geral, perdas por adsorção são consideradas as causas mais rápidas de depleção do P em solos tropicais sob o bioma Cerrado (SOUSA et al., 2014). A capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a energia de ligação (EL) dos fosfatos aos colóides do solo foram descritas pela primeira vez por Olsen & Watanabe (1957) utilizando as equações de Langmuir (1918). No modelo de Langmuir a Isoterma é do tipo “L” que representa a progressiva saturação dos sítios de adsorção. Nas curvas do tipo “L”, atinge-se um patamar que caracteriza o ponto em que ocorreu a adsorção máxima do íon na superfície do adsorvente (VALLADARES et al., 2003; EBERHARDH et al., 2008; MELÉM Jr. et al., 2008, FARIAS et al., 2009).

O modelo empírico de Langmuir baseia-se em suposições, citadas por Alleoni et al., (2009): os íons são sorvidos em camada única na superfície e ocorre sorção máxima assim que a superfície é preenchida; a sorção ocorre em posições específicas e só existe uma molécula por posição ou sítio; todas as posições ou sítios são idênticos e a superfície é homogênea; a energia de sorção é constante em toda a superfície e independente da superfície coberta; as espécies sorvidas não interagem e finalmente o equilíbrio é atingido.

Tendo em vista a tecnologia dos fertilizantes fosfatados de liberação lenta, este estudo teve como hipótese que a manutenção da concentração de P no solo por maior tempo pela taxa mais lenta de liberação do P quando aplicados esses fertilizantes aumenta a produção de grãos promovendo maior eficiência de uso do fertilizante fosfatado e menor perda de P por adsorção.

O presente estudo em Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico (EMBRAPA, 2013) visa contribuir para elevar a disponibilidade de fósforo e reduzir as quantidades aplicadas de fertilizantes fosfatados no solo amenizando as reações de retenção do P no sistema coloidal. De acordo com Russel & Russel (1973), nesse sistema é que ocorrem substituições estequiométricas de um íon por outro configurando a troca iônica, que depois da fotossíntese é o processo mais importante para a vida na terra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEONI, L. R. F., MELLO, J. W. V. de, ROCHA, W. S. D. da, “Eletroquímica, Adsorção e Troca Iônica no Solo”. *In*: Melo, V.F.de, Alleoni, L.R.F. (eds), **Química e Mineralogia do Solo. Parte II – Aplicações**, 1 ed., capítulo XII, Viçosa, BR, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009a.

ALLEONI, L. R. F., CAMARGO, O. A. de, CASAGRANDE, J. C., *et al.*, **Química dos Solos altamente intemperizados**. *In*: Melo, V.F.de, Alleoni, L.R.F. (eds), **Química e Mineralogia do Solo. Parte II - Aplicações**. 1ª ed., capítulo XVIII, Viçosa, BR, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009b.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos. 2008. v. 1. 248p.

CORDELL, D. **The Story of Phosphorus: Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security**. Vol. 19, n. 2, p. 292-305. *In*: Global Environmental Change, Elsevier, 2009.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T; GUIMARÃES, M. F. **Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:1009-1016, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa Solos. Ed. 3. Rio de Janeiro, Brasil, 196 pp.

FARIAS D. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SANTOS, D.; ARRUDA, J. A.; HOFFMANN, R. B.; NOVAIS, R. F. **Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba - Isotermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33:623-632, 2009.

FARIAS. C. C.; SILVA JÚNIOR, M. L.; RUIVO, M. L.P.; RODRIGUES, P. G., Melo, V. S.; COSTA A.R.; and SOUZA JÚNIOR, J. C. **Phosphorus Forms in Ultisol Submitted to Burning and Trituration of Vegetation in Eastern Amazon**. Revista Brasileira de Ciência do Solo; v.40: e 0150198.2016.

FIXEN, P. E. **Reserva mundial dos nutrientes de fertilizantes**. IPNI: Informações Agronômicas, Piracicaba, v. 26, junho 2009.

LANGMUIR, I. **The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum**. J. Am. Chem. Soc., 1918, 40 (9), pp 1361–1403.

LOPES, A.S. & GUIMARÃES L.R. G. **Chapter One - A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil**. Advances in Agronomy. Volume 137, 2016, Pages 1-72.

MACHADO V. J.; SOUZA, C. H. E. **Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato Monoamônico de liberação lenta**. Biosci. J. Uberlândia, v. 28, supplements 1, p. 1-7, Mar. 2012.

MARIN F. R., MARTHA, G. B., CASSMAN, K. G., Grassini P.; **Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil**, BioScience, Volume 66, Issue 4, 1 April 2016, Pages 307–316.

MELÉM Jr., N. J.; CARNEIRO, C. E. A.; BRITO, O. R. et al. **Adsorção e fósforo remanescente em Latossolo distrófico amarelo do cerrado do Amapá**. II Simpósio Internacional Savanas tropicais e IX Simpósio Nacional do Cerrado. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais. 12 a 17 de outubro de 2008. Brasília, DF.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. **Fósforo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. 15 Fertilidade do Solo. Viçosa, SBCS, 2007. 1017p.

OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S. **A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm**. Soil Science Society of American Proceedings, Madison, v.21, p.144-149, 1957.

SCHOLZ, R. W. & WELLMER, F. W. **Losses and use efficiencies along the phosphorus cycle. Part 1: Dilemmata and losses in the mines and other nodes of the supply chain**. Resources, Conservation and Recycling. Volume 105, Part B, December 2015, Pages 216-234.

SHARMA, G. C. **Controlled-release fertilizers and horticultural applications**. Scientia Horticulturae, Alabama, USA, v.11(2): 107-129. 1979.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C. **Adsorção e modelos**. In: Tópicos em Ciência do solo. Viçosa-MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v.6, p. 61-184.

SOUSA, D. M. G. **Fósforo**. In Boas Práticas para uso eficiente de fertilizantes. Piracicaba SP, 2014.

SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REIN, A.T. **Adubação fosfatada**. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUZA, E.D.; et al. **Soil quality indicators in a RhodicPaleudult under long-term tillage systems**. Soiland Tillage Research, 139:28–36, 2014.

SOUZA, et al. Eficiência **agronômica de fosfatos de rocha em solo com elevado teor de cálcio trocável**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1816-1825, dez. 2014.

VACCARI, D. A. **Phosphorus: A Looming Crisis**. Scientific American. V. 300, 54 - 59 (2009).

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. **Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa**. Bragantia, Campinas, v.62, n.1, p.111-118, 2003.

VIEGAS, R. A.; NOVAIS, R. F.; SCHULTHAIS, F. **Availability of a soluble phosphorus source applied to soil samples with different acidity levels**. Revista Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1126-1136, Aug. 2010.

WITHERS, et. al. **Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture**. Scientific Reports. Volume 8, (2018).

OBJETIVOS

Geral

Avaliar a eficiência de doses de monoamônio fosfato de liberação lenta em relação ao monoamônio fosfato sobre a produção vegetal, disponibilidade e adsorção de fósforo em um Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico.

Específicos

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência de doses de monoamônio fosfato convencional e de liberação lenta sobre:

- a) Componentes de produtividade de soja e de sorgo em dois cultivos consecutivos;
- b) Os teores de fósforo disponível utilizando a metodologia de Mehlich I;
- c) A disponibilidade residual de fósforo através de extrações sucessivas com extrator Mehlich I;
- d) A capacidade máxima de adsorção de fósforo utilizando os modelos de isotermas de Langmuir nos diferentes tratamentos.

CAPÍTULO I

EFEITO DE MONOAMÔNIO FOSFATO DE LIBERAÇÃO LENTA NA PRODUTIVIDADE DE SOJA E SORGO

RESUMO: O fósforo (P) é o nutriente com baixa mobilidade no solo que mais limita o desenvolvimento das plantas quando insuficientemente disponível. O cultivo da soja na safra seguido do sorgo na safrinha é uma forma de sucessão muito utilizada para a produção de grãos, principalmente nos Latossolos sob o bioma Cerrado com teores de fósforo naturalmente escassos. Os fertilizantes fosfatados solúveis quando aplicados ao solo na presença de água liberam rapidamente seus nutrientes na solução. Algumas tecnologias propõem liberação lenta em vista das reações de retenção do fósforo comuns nos Latossolos. Um estudo foi conduzido durante dois anos com objetivo de avaliar a eficiência do Fosfato Monoamônico de liberação lenta (MAPSR) comparado ao Fosfato Monoamônico Convencional (MAP). O delineamento experimental com quatro blocos ao acaso e esquema fatorial 2 x 6 consistiu de duas fontes de fósforo (MAP e MAPSR) nas doses de 0; 54; 108; 162; 216 e 270 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em uma área experimental do IFGoiano Campus Rio Verde - GO. Foi realizada a análise de P remanescente em todas as profundidades das amostras. Em seguida, as demais análises químicas somente foram realizadas na profundidade de 0,00-0,05 m em que houve variação significativa do P-remanescente em função dos tratamentos. Avaliou-se o efeito de doses de MAP e MAP de liberação lenta sobre a produtividade de soja e sorgo e o efeito residual de P disponível no solo. Para tanto foram determinados os teores de fósforo disponível (Mehlich 1), o número de vagens, o peso de mil grãos e a eficiência de incremento de produtividade de soja e de sorgo cultivado em sucessão à soja e sem adubação fosfatada nas safras 2014/2015 e 2015/2016. Com os resultados obtidos neste trabalho pode se inferir que houve incremento de produção de grãos de soja nas safras 2014/2015 e 2015/2016 e de produção de panícula de sorgo na safrinha 2015 com a aplicação do MAPSR. Com a aplicação do MAPSR, também se obteve maior efeito residual do P disponível no solo.

PALAVRAS CHAVE: *Glycine max* L., *Shorgum bicolor*, Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico, fósforo residual

CHAPTER I

EFFECT OF SLOW RELEASE MONOAMMONIUM PHOSPHATE ON SOYBEAN AND SORGHUM PRODUCTIVITY

ABSTRACT: Phosphorus (P) is the nutrient with low mobility in the soil that more limits the development of plants when insufficiently available. The cultivation of soybean in the crop followed by sorghum in the off-season is a form of succession widely used for grains production, mainly in the Oxisols under the Cerrado biome with naturally low phosphorus contents. Soluble phosphate fertilizers when applied to the soil in the presence of water quickly release their nutrients into the solution. Some technologies offer slow release in view of common phosphorus retention reactions in Oxisols. A study was carried out over two years to evaluate the efficiency of the slow release Monoammonium Phosphate (MAPSR), compared to Conventional Monoammonium Phosphate (MAP). The experimental design with four randomized blocks and 2 x 6 factorial scheme consisted of two sources of phosphorus (MAP and MAPSR) in doses of 0; 54; 108; 162; 216 and 270 kg.ha⁻¹ of P₂O₅ in an experimental area of the IFGoiano Rio Verde Campus-GO. Remaining P analysis was performed at all depths of the samples. Then, the other chemical analyzes were only performed at a depth of 0.00-0.05 m in which there was a significant variation of the remaining P-value in function of treatments. The effect of slow release MAP and MAP doses on soybean and sorghum productivity and the residual effect of P available on soil was evaluated. For this, the levels of available phosphorus (Mehlich 1), the number of pods, the thousand grains weight and the productivity increase efficiency of soybean and sorghum grown in succession to soybean and without phosphorus fertilization in the 2014 / 2015 and 2015/2016 crops were determined. With the results obtained in this work it can be inferred that there was an increase in the production of soybeans in the 2014/2015 and 2015/2016 crops and the sorghum panicle production in the off-season 2015 with MAPSR application. With MAPSR application, a higher residual effect of soil P was also obtained.

KEY WORDS: *Glycine max* L., *Shorghum bicolor*, Nitossolic Dystrophic Red Latosol, residual phosphorus

1.1 Introdução

O Brasil é atualmente um dos maiores produtores de alimento e bioenergia do mundo e com potencial para expandir, sendo muito importante para a segurança alimentar futura (MARIN, *et al.*, 2016; LOPES & GUIMARÃES, 2016). Entretanto existe preocupação econômica e ambiental relevante na expansão da agricultura brasileira que é o aumento da necessidade de fertilizantes para o aumento da produção agrícola, e em particular do fósforo (P) (WITHERS *et al.*, 2018). Uma vez que a maioria dos solos brasileiros são drenos de P (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOARES & CASAGRANDE, 2009) há necessidade de aplicar grandes quantidades devido à baixa eficiência dos fertilizantes (SCHOLZ & WELLMER, 2015; MARIN, *et al.*, 2016; LOPES & GUIMARÃES, 2016; WITHERS *et al.*, 2018).

Fertilizantes fosfatados granulados podem reduzir o tempo de contato com o solo em relação à época de plantio pelo parcelamento das aplicações (SOUSA & LOBATO, 2004) aplicação localizada (KER, 1995; LEITE *et al.*, 2006) ou pelo revestimento dos grânulos que propõem liberação lenta do nutriente amenizando a retenção do fósforo (NOVAIS & SMYTH, 1999; VIEIRA & TEIXEIRA, 2004; ALCARDE, 2009; SOARES & CASAGRANDE, 2009).

A aplicação de monoamônio fosfato (MAP) de liberação lenta proporciona aumento de produção de grãos em relação ao MAP sem revestimento nas culturas do milho, soja e feijão-caupi (FIGUEIREDO *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2013; SOUZA *et al.*, 2014). Esses autores justificaram o aumento da eficiência do Monoamônio Fosfato como decorrência da liberação lenta de fósforo absorvível ao longo do ciclo da cultura apresentando melhor desenvolvimento vegetativo revertido em respostas lineares crescentes de produtividade, produção de massa da matéria seca total e altura de planta de feijão-caupi (RODRIGUES *et al.*, 2013); massa de matéria seca de raízes, parte aérea e produtividade de soja (SOUZA *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2014) e de milho (FIGUEIREDO, *et al.*, 2012).

Tendo em vista a tecnologia dos fertilizantes fosfatados de liberação lenta, este estudo teve como hipótese que a manutenção da concentração de P no solo por maior tempo devido à taxa mais lenta de liberação do P quando aplicados esses fertilizantes, aumenta a produção de grãos promovendo maior eficiência de uso do fertilizante fosfatado e menor perda de P por adsorção.

O aumento da eficiência dos fertilizantes na produção agrícola é um problema multidisciplinar especialmente o uso eficiente do fósforo que inclui a otimização da interação fertilizante-solo-planta (BERNARDO et al., 2014). Assim, objetivou-se avaliar o efeito de doses de MAP e MAP de liberação lenta sobre a produtividade de soja e de sorgo e o efeito residual de P disponível no solo.

1.2 Material e métodos

O trabalho foi conduzido em campo na área experimental do IF Goiano, Campus Rio Verde, GO sobre Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico (EMBRAPA, 2013), Latitude 17°48'22"S, Longitude 50°54'07"O e altitude 841m cultivada anteriormente com pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Antes do plantio foram realizadas amostragem do solo para a caracterização química e física nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m (Tabela 1).

Tabela 1: Caracterização química e textural do solo¹. Metodologia: Embrapa (2009);²pH CaCl₂ e³P Mehlich I.⁴Estimado pelo método SMP.

Prof.	pH ²	P ³	K	Ca	Mg	Al	H+Al ⁴	SB	T	V	m	MO	Argila	Silte	Areia
(m)		--mg dm ⁻³ --				-----cmol,dm ⁻³ -----							-----%		
0,00-0,10	5,9	5,81	202,8	5,01	2,92	0,02	3,27	8,45	11,72	72,12	0,20	5,19	55,64	7,63	36,73
0,10-0,20	5,7	3,52	124,8	4,54	2,17	0,04	3,53	7,03	10,56	66,50	0,56	4,24	55,06	8,22	36,72
0,20-0,30	5,5	2,76	101,4	4,25	1,46	0,06	3,77	5,97	9,74	61,34	0,99	3,65	57,30	9,87	32,83
0,30-0,40	5,2	2,30	74,1	3,74	1,09	0,08	4,10	5,02	9,12	54,47	1,56	2,72	56,20	9,87	33,94

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, arranjo fatorial 2 x 6 sendo duas fontes de P: MAP convencional (MAP) (51% de P₂O₅) e MAP de liberação lenta (MAPSR) (49% de P₂O₅) e seis doses (0; 54; 108; 162; 216 e 270 kg ha⁻¹ de P₂O₅) com quatro blocos. A parcela foi composta por cinco linhas espaçadas 0,45 m entre si e com cinco metros de comprimento cada, totalizando 11,25m². Para as avaliações foram desconsiderados um metro e uma linha de cada extremidade da parcela. A adubação fosfatada na safra 2014/2015 foi realizada na linha na profundidade de 0,05 a 0,07. Na safrinha 2015 não foi aplicado fertilizante fosfatado. Na safra 2015/2016a adubação fosfatada dos tratamentos foi realizada na superfície ao lado da linha de plantio perfazendo uma faixa de 0,10 m.

Após a colheita do sorgo na safrinha 2015 e após a colheita da soja na safra 2015/2016, foram realizadas as amostragens do solo, sendo seis amostras simples por parcela nas profundidades de 0 a 0,05; 0,05 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m com auxílio de um trado holandês. A amostra simples foi composta por uma faixa de solo entre as linhas e na linha de plantio (SOUSA & LOBATO et al., 2004).

As amostras foram secas ao ar, passadas em peneira de 2 mm de abertura, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas para análises. Foi realizada a análise de P remanescente em todas as amostras, conforme procedimentos em Alvarez, et. al., (2000). Em seguida, as demais análises químicas foram realizadas apenas na profundidade de 0 a 0,05 m em que houve variação significativa do P-rem em função dos tratamentos. Assim, avaliação do P disponível na profundidade de 0 a 0,05 m de profundidade utilizando o extrator Mehlich I (MEHLICH, 1953) e determinação segundo procedimentos em EMBRAPA, (2009). O extrator de Mehlich I foi escolhido por ser indicado para avaliar a disponibilidade de P em solos sem adubação e com aplicação de adubos fosfatados (GATIBONE et al., 2002; EBERHARDT et al., 2008; EMBRAPA, 2009) como o MAP.

As variáveis de produção analisadas para a cultura da soja foram: número de vagens por planta, peso de mil grãos, produtividade da soja cv. Intacta RR PRO2 M7110 e a eficiência de incremento de produção em função de doses das fontes de fósforo MAP e MAPSR nas safras 2014/2015 e 2015/2016,

Para a cultura do sorgo cv. *Booster* cultivado na safrinha de 2015 em sucessão à soja da safra 2014/2015 foram avaliadas a produção de massa seca de panícula (MSP), da parte aérea (MSPA) e total MST (kg ha^{-1}) e eficiência residual de incremento de produção (EF) em função de doses das fontes de fósforo MAP e MAPSR.

Todas as avaliações e análises químicas foram realizadas no laboratório de Química Agrícola, no IF Goiano, Campus Rio Verde - GO.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e ajuste de modelos matemáticos em função das doses de P_2O_5 com auxílio do programa Sigma Plot v. 1.1. e foram escolhidos os modelos que apresentaram maior significância.

1.3 Resultados e discussão

A produtividade de soja nas safras 2014/2015 e 2015/2016 e de sorgo na safrinha 2015 variaram com as doses das fontes de fósforo (P) (Figuras 1 e 2). Na safra 2014/2015 houve incremento linear da produtividade de soja em função das doses de MAP e MAPSR (Figura 1 C). O MAPSR e o MAP apresentaram incrementos respectivos de 6,72 e 6,32 kg de soja a cada kg de P_2O_5 aplicado. A eficiência da fonte de liberação lenta na cultura da soja foi relatada por Souza et al., (2014) que com a aplicação de 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 via MAP de liberação lenta foi capaz de atingir a maior produção de grãos obtida com o MAP convencional nas doses de 80 a 120 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Na mesma dose de 40 kg ha^{-1} o MAP de liberação lenta produziu 448 kg ha^{-1} a mais de soja que o MAP convencional.

Neste trabalho, na maior dose estudada (270 kg ha^{-1} de P_2O_5) a produção estimada foi de 4.260 kg ha^{-1} de soja com a aplicação do MAP e 4.680 kg ha^{-1} de soja com a aplicação do MAPSR. Respostas a doses muito altas de fósforo são comuns em solos com baixos teores de fósforo disponível. Esses valores podem ser explicados pelo fato da resposta da cultura ao uso de fertilizantes dependerem do estado da fertilidade do solo. Logicamente, solos de baixa fertilidade apresentam alta probabilidade de resposta ao uso de nutrientes (RIBEIRO et al., 2013).

Com base na análise química do solo (Tabela 1) e a interpretação e recomendação conforme Souza & Lobato (2004), a dose a ser aplicada seria de 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 na adubação de manutenção. Nessa dose as produtividades estimadas seriam de 3.185 com a aplicação do MAP e 3.540 kg ha^{-1} de soja com a aplicação do MAPSR. Assim, com a aplicação do MAPSR na maior dose estudada e na dose recomendada por Souza & Lobato (2004) o incremento de produtividade seria de 10 e 11%, respectivamente. Os menores valores de produtividade obtidos com o MAP convencional podem estar associados ao contato direto dos grânulos com os colóides do solo, favorecendo a adsorção e reduzindo desta forma a disponibilidade do nutriente para as plantas (GOMES et al., 2005)

Dentre os componentes de produção da soja: número de vagens e peso de mil grãos, as doses de MAPSR obtiveram incremento linear no número de vagens, e o MAP o incremento linear de peso de 1000 grãos (Figuras 1 A e B). O incremento do peso de 1000 grãos obtido com o MAP não foi suficiente para incrementar a produtividade da soja no mesmo nível que o MAPSR. Essa afirmativa pode ser explicada pela eficiência

de cada fonte (EF) (Figura 1 D). Para o MAP houve incremento de produtividade em relação à dose 0 (zero) de 9,10 kg de soja para cada kg de P_2O_5 utilizado, independente das doses. Com a aplicação do MAPSR houve EF de 31,2 com a menor dose estudada (54 kg ha^{-1} de P_2O_5) seguido de redução. Com a dose recomendada por Souza e Lobado (2014) a EF foi de 9,1 e 19,5 com o uso do MAP e do MAPSR, respectivamente.

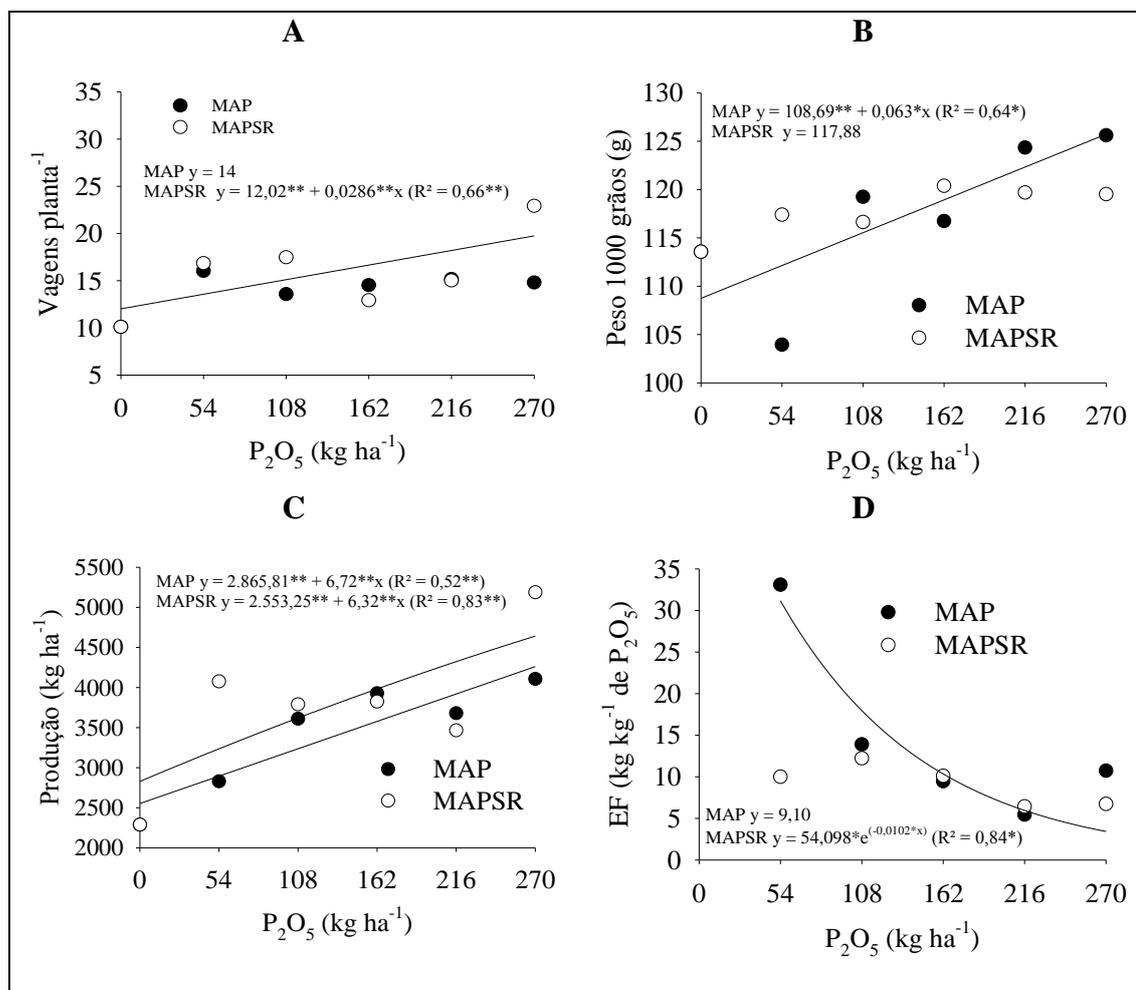


Figura 1 Número de vagens por planta (A), peso de 1000 grãos (B), produtividade da soja cv. Intacta RR PRO2 M7110 (C) e (EF) eficiência de incremento de produtividade (D) em função de doses das fontes de fósforo MAP E MAPSR na safra 2014/2015. **. *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Para o sorgo safrinha 2015 cultivado em sucessão à soja e sem adubação fosfatada, apenas se obtiveram incremento de produção de panícula (Figura 2 A) com as doses de MAPSR. Esse resultado pode ser atribuído ao maior efeito residual do MAPSR comparado ao MAP e/ou à relação fonte e dreno que nesse caso propiciou maior aporte de fotoassimilados para a panícula. A massa seca de parte aérea e a total e a EF (Figuras

2 B, C e D), não ajustaram a modelos em função das doses de P_2O_5 pelo MAP e MAPSR.

Na safra 2015/2016 o peso de mil grãos da soja cv. Intacta RR PRO2 M7110 ajustou exponencialmente em função das doses de P_2O_5 com a utilização do MAPSR, enquanto para o MAP não houve ajuste (Figura 3 A).

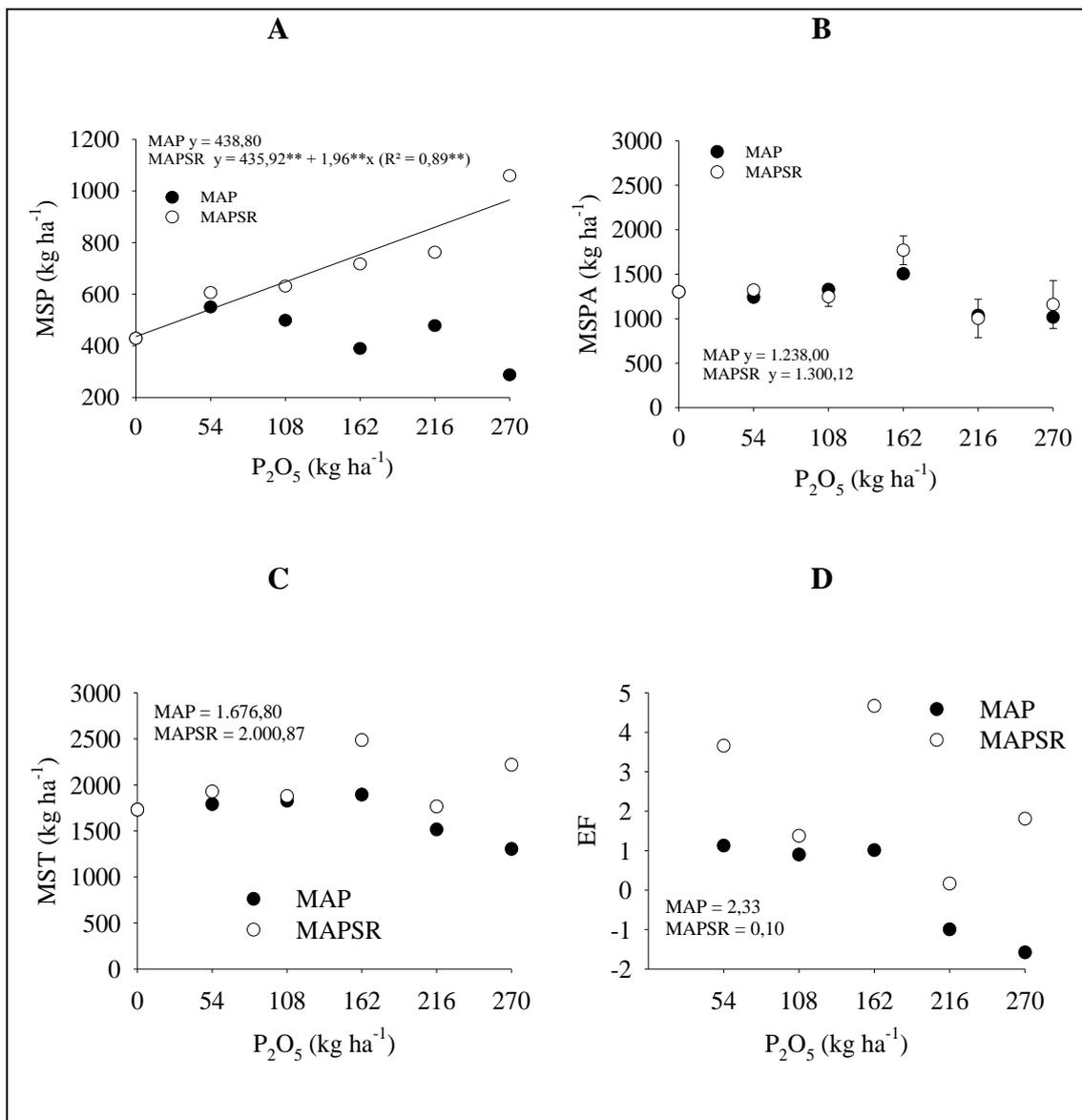


Figura 2. Produção de massa seca de panícula (MSP) (A), parte aérea (MSPA) (B) e total (MST) (C) ($kg\ ha^{-1}$) e eficiência residual de incremento de produtividade (EF) (D) do sorgo cv. *Booster* cultivado em sucessão à soja em função de doses das fontes de fósforo MAP E MAPSR na safrinha 2015. .**, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

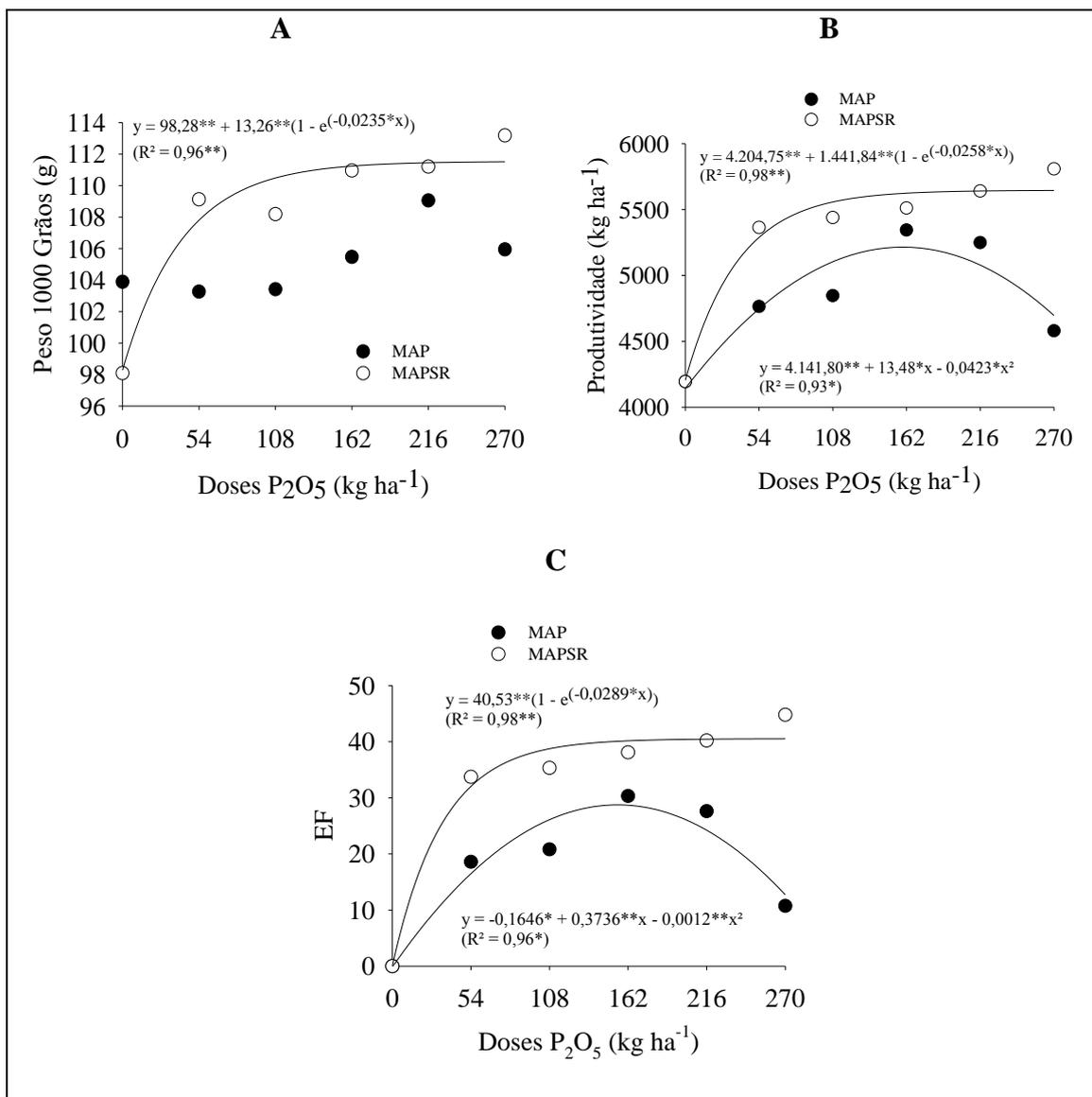


Figura 3. Peso de 1000 grãos (A), produtividade da soja cv. Intacta RR PRO2 M7110 (B) e eficiência de incremento de produção (EF) (C) em função de doses das fontes de fósforo MAP E MAPSR na safra 2015/2016. .**.*Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

A utilização do MAP convencional resultou no ajuste quadrático em que a máxima produtividade estimada foi de 5.215 kg ha⁻¹ com a dose de 159,4 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Com a utilização do MAPSR foi estimada produtividade de 5.292,55 kg ha⁻¹ com a dose de 54 kg ha⁻¹ de P₂O₅ sendo, semelhante ao valor máximo de 5.215 kg ha⁻¹ obtido com a dose de 159,4 kg ha⁻¹ de P₂O₅ quando utilizada a fonte MAP (Figura 3 B). A obtenção da mesma produtividade na segunda safra com dose de MAPSR inferior ao MAP pode ser atribuída ao maior efeito residual da primeira fonte. Tecnicamente há redução de 105,4 kg de P₂O₅ quando utilizada a fonte MAPSR. Demonstrou-se que houve aplicação de luxo do fertilizante MAP a partir de 159,4 kg ha⁻¹ de P₂O₅ tornando

mais oneroso o processo produtivo pelo ponto de vista da eficácia financeira e ambiental, pois nas doses superiores a $159,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 houve redução da produtividade e excesso de fertilizantes lançados ao solo. Essa redução na dose de fertilizante fosfatado devido à tecnologia de liberação lenta vem ao encontro da necessidade de aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes fosfatados por serem obtidos de fontes naturais finitas, principalmente no Brasil (BERNARDO et al., 2014; LOPES & GUIMARÃES, 2016).

Os dados de EF obtiveram resultado semelhante ao da produtividade (Figura 3 C) evidenciando que o MAPSR apresenta maior eficiência tanto na primeira (Figura 1) quanto na segunda safra (Figura 3). Esse resultado pode ser atribuído ao maior efeito residual justificado pela liberação lenta possibilitando menores perdas por precipitação e, ou, adsorção.

Os teores de P disponível (Mehlich I) após a colheita da safrinha de sorgo 2015 e da safra de soja 2015/2016 na profundidade de 0 a 0,05 m ajustaram às doses de P_2O_5 linearmente com a fonte MAP e exponencialmente com a fonte MAPSR (Figuras 4 A e B). Após a primeira safrinha 2016 (Figura 4 A), os maiores valores de P disponível no solo (6,15 e 6,00) foram obtidos com 270 kg ha^{-1} de P_2O_5 via MAP e MAPSR, respectivamente (Figura 4 A). Após a segunda safra, 2015/2016, (Figura 4 B) o maior valor de P disponível no solo foi de $5,15 \text{ mg dm}^{-3}$ com 270 kg ha^{-1} de P_2O_5 via MAP.

Com a aplicação do MAPSR para a obtenção de $5,15 \text{ mg dm}^{-3}$ de P disponível no solo foi necessário aplicar 167 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Com esses dados pode afirmar, em geral, que com o uso do MAPSR há efeito residual da primeira para a segunda safra (SOARES & CASAGRANDE, 2009).

Conforme Gatibone et al., (2002), para altos teores de P no solo, o extrator duplo ácido Mehlich I apresenta alta eficiência. E como neste estudo não foi utilizada fonte contendo fosfatos monocálcicos, o extrator Mehlich I não poderia superestimar o teor de P disponível porque o referido extrator é eficiente em extrair P ligado a cálcio (NOVAIS & SMYTH, 1999).

Pode-se inferir que o uso de tecnologia de liberação lenta MAPSR aumenta a eficiência do fertilizante, proporcionando maior produtividade das culturas. E com o efeito de liberação lenta do MAPSR, possivelmente haverá redução de perdas de P por precipitação e adsorção. Assim, com maior efeito residual de um ano para o outro, é possível reduzir as doses de fertilizante fosfatado quando da aplicação do MAPSR após os anos de aplicação. No presente trabalho, para obter o mesmo valor de P disponível no

solo após a segunda safra foi necessário 270 kg ha⁻¹ de P₂O₅ via MAP e 167 kg ha⁻¹ de P₂O₅ via MAPSR (FIGURAS 4 e B), ou seja, uma economia de 103 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Quanto maior a entrada de P no sistema, mais difícil se torna aumentar a eficiência de uso do fertilizante fosfatado (SCHOLZ & WELLMER, 2015).

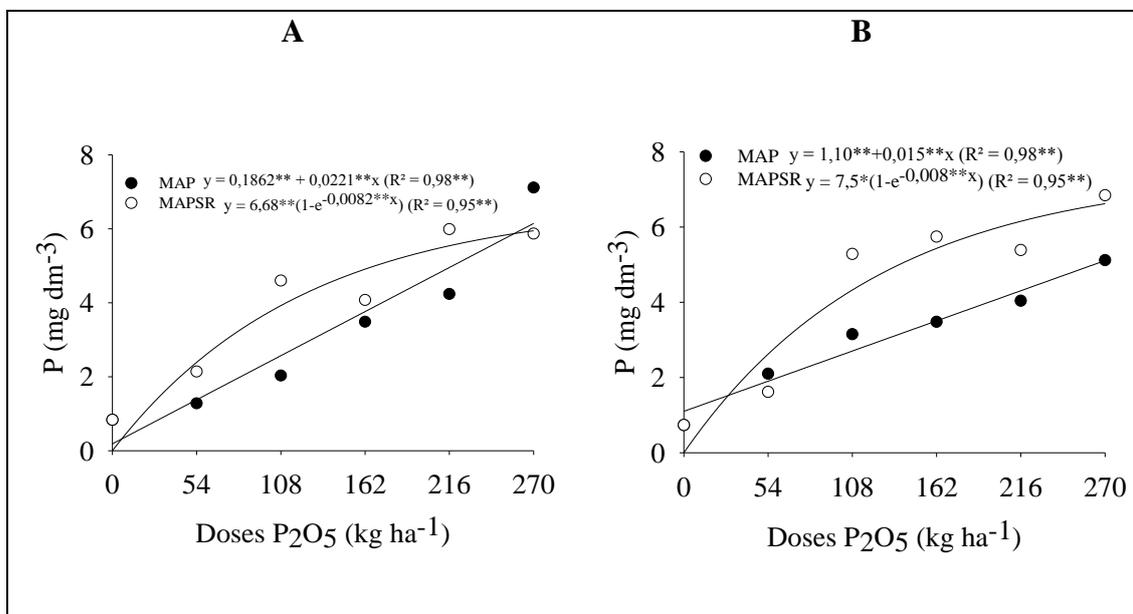


Figura 4 Teores de fósforo (P) no solo (Mehlich I) na profundidade 0 a 0,05 m após safrinha 2015 (A) e safra 2015/2016 (B) em função das doses das fontes MAP e MAPSR. . **, * Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

O Brasil se encontra diante de um enorme desafio para o manejo do fósforo nos solos cultivados visando melhorar o uso de terras agrícolas atuais para atender demandas de produção e ao mesmo tempo de conservação dos recursos naturais para as próximas gerações (LOPES & GUIMARÃES, 2016). Contudo sua alta dependência de fósforo inorgânico via fertilizante não é um uso sustentável de um recurso crítico e finito (WITHERS, et. al., 2018). A disponibilidade do P no solo na fase líquida é função da sua mobilidade na fase sólida (GATIBONE, 2002). A liberação gradual promovida pelo revestimento do nutriente reduz o contato do fósforo com os óxidos e argilas impedindo a formação de compostos de difícil dissolução que indisponibilizaria o P no solo (AGOSTINHO et al., 2010). Provavelmente a tecnologia de fertilizantes de liberação lenta de fósforo seja uma alternativa interessante e mais sustentável, principalmente quando associada à adição de sistemas de cultivo que favoreçam a ciclagem do P no solo.

1.4 Conclusões

Com os resultados obtidos no presente trabalho em Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico conclui-se que a aplicação do MAPSR incrementa a produção de grãos de soja nas safras 2014/2015 e 2015/2016 e de produção de panícula de sorgo na safrinha 2015. Com a aplicação do MAPSR, também se obtém maior efeito residual do P disponível no solo.

1.5 Referências bibliográficas

AGOSTINHO, F. B. et al. **Efeito do uso de MAP revestido com polímeros de liberação gradual em atributos de solo e produtividade de matéria seca no milho.** *In*: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 28, 2010, Goiânia. Resumos...Goiânia: ABMS, 2010. p. 6.

ALCARDE, J. C. **Manual de Análise de fertilizante.** Piracicaba: FEALQ, 2009. 259 p.

ALLEONI, L. R. F., CAMARGO, O. A. de, CASAGRANDE, J. C., *et al.*, **Química dos Solos Altamente Intemperizados.** *In*: Melo, V.F.de, Alleoni, L.R.F. (eds), Química e Mineralogia do Solo. Parte II - Aplicações. 1^a ed., capítulo XVIII, Viçosa, BR, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009b.

ALLEONI, L. R. F., MELLO, J. W. V. de, ROCHA, W. S. D. da, **“Eletroquímica, Adsorção e Troca Iônica no Solo”.** *In*: Melo, V.F.de, Alleoni, L.R.F. (eds), Química e Mineralogia do Solo. Parte II – Aplicações, 1 ed., capítulo XII, Viçosa, BR, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009a.

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente.** Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.25, p.27-33. (Boletim Informativo).

BERNARDO, B.N. et al. **When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil.** *Global Environmental Change.* Volume 28, September 2014, Pages 84-97.

BORTOLON, L. & GIANELLO, C. **Fósforo extraído pela solução de mehlich-1 determinado por colorimetria e ICP em solos do sul do Brasil.** *R. Bras. Ci. Solo*, 34:263-268, 2010.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T; GUIMARÃES, M. F. **Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:1009-1016, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Embrapa Solos. Rio de Janeiro, Brasil, 196 pp.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Análise de Químicas de Solo, Plantas e Fertilizantes**. Brasília 2^a. ed. rev. ampl. - Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

FERREIRA, E.V. **Vamos economizar fertilizantes mantendo a nutrição das plantas?**2010.Disponível:<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp>. Acesso: 07. Maio. 2018.

FIGUEIREDO, C.C; BARBOSA, D.V; OLIVEIRA, S.A; MARCELO FAGIOLI, M E SATO, J. H **Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho**. Rev. Ciênc. Agron., v. 43, n. 3, p. 446-452, jul-set, 2012.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. RHEINHEIMER, D. S. & SAGGIN, A. **Quantificação do fósforo disponível por extrações sucessivas com diferentes extratores em Latossolo vermelho distroférico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 26:1023-1029, 2002.

GOMES, J.A.et al. **Adubações orgânica e mineral, produtividade do milho e características físicas e químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo**. Acta ScientiarumAgronomy, Maringá, v.27, n.3, p.521-529, 2005.

KÄMPF, N, CURI, N. & MARQUES, J. J.**Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio**. In: Química e Mineralogia do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1^a Edição, 2009.

KER, J. C.; FONTES, M. P. F.; SOUZA, A. R.; RESENDE, M. **Adsorção de fósforo em alguns solos latossólicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem**.Rev. Ceres, Viçosa, 43:216-226, 1996.

LOPES, A.S. & GUIMARÃES G. L.R. . Chapter One - **A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil**.Advances in Agronomy. Volume 137, 2016, Pages 1-72.

MALAVOLTA, E.**Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo**.São Paulo: Agronômica Ceres, 1976. 528p.

MARIN F. R., MARTHA, G. B., CASSMAN, K. G., Grassini P.; **Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil**, BioScience, Volume 66, Issue 4, 1 April 2016, Pages 307–316.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh, University of North Carolina, 1953.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. **Fósforo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, 2007. 1017p.

RIBEIRO, V. J., et al. **Produtividade de soja sob Plantio Direto em Resposta a Adubação Polimerizada**. XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 28 de julho A 2 de agosto de 2013. Costão do Santinho Resort. Florianópolis-SC.

RODRIGUES, C. et al. **Desempenho do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L., Walp) com doses crescentes de fertilizante fosfatado polimerizado**. XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 28 de julho a 2 de agosto de 2013. Costão do Santinho Resort. Florianópolis – SC.

SATTARI, S. Z.; BOUWMAN, A. F.; GILLERA, K. E. ,and ITTERSUMA, M. K. van. **Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle**. PNAS | April 17, 2012 | vol. 109 | no. 16 | 6353.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. **Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review**. Clay Minerals, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008.

SCHOLZ R.W., ROY A.H., HELLUMS D.T. **Sustainable Phosphorus Management: A Transdisciplinary Challenge**. In: Scholz R., Roy A., Brand F., Hellums D., Ulrich A. (eds) Sustainable Phosphorus Management. Springer, Dordrecht, (2014).

SCHOLZ, R. W. & WELLMER, F. W. **Losses and use efficiencies along the phosphorus cycle. Part 1: Dilemmata and losses in the mines and other nodes of the supply chain**. Resources, Conservation and Recycling. Volume 105, Part B, December 2015, Pages 216-234.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C. **Adsorção e modelos**. In: Tópicos em Ciência do solo. Viçosa-MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v.6, p. 61-184.

SOUSA, D. M. G. **Fósforo**. In **Boas Práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba SP, 2014.

SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REIN, A.T. **Adubação fosfatada**. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2004.p

SOUZA, E.D.; et al. **Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long-term tillage systems**. Soil and Tillage Research, 139:28–36, 2014.

SOUZA, et al. **Eficiência agronômica de fosfatos de rocha em solo com elevado teor de cálcio trocável**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1816-1825, dez. 2014.

SOUZA, J. R., et al. **Eficiência do fósforo revestido com polímeros na cultura da soja.**Acta Iguazu, Cascavel, v.3, n.4, p. 1-9, 2014.

SOUZA, J.R et. al. **Avaliação da eficiência agrônômica e viabilidade técnica da utilização de kimcoat- P na cultura da soja.**VI Congresso Brasileiro de Soja. Cuiabá, MT – 2012.

SPOSITO, G. **The Chemistry of Soils.**2 ed, New York, Oxford University Press, 2008.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. **Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa.** Bragantia, Campinas, v.62, n.1, p.111-118, 2003.

WITHERS, et. al. **Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture.**Scientific Reports. Volume 8, (2018)

CAPÍTULO II

AValiação da Disponibilidade de Fósforo no Solo com uso de fonte de liberação lenta

RESUMO: O fósforo é aplicado ao solo como forma protonada H_2PO_4^- (predominante em solos ácidos), HPO_4^- , ou H_3PO_4 do anion fosfato que é altamente sensível ao pH e suscetível às reações físico-químicas que reduzem sua disponibilidade nos Latossolos. Essas reações, de adsorção e, ou precipitação e o tipo de precipitado determinam a disponibilização do fósforo a partir de fosfatos solúveis. Um estudo foi conduzido em campo com o objetivo de quantificar o fósforo remanescente, estimar a adsorção máxima e a depleção de fósforo do Monoamônio Fosfato de liberação lenta *Slow Release* (MAPSR) e do Monoamônio Fosfato (MAP) no Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde - GO após as safras 2014/2015 e 2015/2016. O delineamento experimental com quatro blocos ao acaso e esquema fatorial 2 x 6 consistiu de duas fontes de fósforo (MAP e MAPSR) nas doses de 0; 54; 108; 162; 216 e 270 kg/ha^{-1} de P_2O_5 . O fósforo remanescente foi determinado após uma hora de agitação do solo em solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} contendo 60 mg L^{-1} de P na proporção solo-solução de 1:10. A Capacidade de adsorção máxima de Adsorção de P foi estimada por meio de modelos lineares de Langmuir. Para avaliar a disponibilidade residual de fósforo por meio da depleção do nutriente na solução foram realizadas extrações sucessivas com o extrator duplo ácido Mehlich I. Todas as amostras foram submetidas a 11 extrações até que os teores de P atingissem a estabilização. Na safra 2014/2015 quando utilizado o MAP houve ajuste linear crescente com o teor máximo de 38,41 mg L^{-1} de P-rem determinado com a maior dose (270 kg/ha^{-1} de P_2O_5), indicando que parte do fósforo aplicado permanecia no solo podendo ter efeito residual para a próxima safra, ser precipitado ou adsorvido. Ainda na safra 2014/2015, quando aplicado o MAPSR, houve ajuste quadrático com o máximo valor de fósforo remanescente (38,72 mg L^{-1}) obtido com 134,25 kg ha^{-1} de P_2O_5 . A redução do fósforo remanescente após a dose de 134,25 kg ha^{-1} de P_2O_5 significou aumento do poder de adsorção de fósforo no solo, mesmo aplicando doses mais altas de fertilizante. Na segunda safra o incremento do fósforo remanescente com as doses de P_2O_5 foi linear com maior incremento por kg de P_2O_5 aplicado via MAP (0,0187 mg/L^{-1}) em comparação ao MAPSR (0,0151 mg/L^{-1}). Esse resultado demonstra que o MAPSR propicia menor incremento de fósforo

remanescente, e pode estar relacionado com o aumento de produtividade em razão da maior absorção pelas plantas. Os resultados obtidos nas extrações sucessivas (Mehlich I) indicaram que os maiores valores dos componentes de produção vegetal obtidos com o uso do MAPSR na safra 2014/2015 podem ser atribuídos ao maior efeito residual dessa fonte comparada ao MAP, e esse efeito foi intensificado quanto maior a dose de P_2O_5 . O MAPSR libera anion fosfato mais lento que o MAP tradicional e houve redução de adsorção de P no solo com a aplicação do MAPSR ao final de duas safras.

PALAVRAS CHAVE: monoamônio fosfato, Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico, Mehlich I, extração sequencial, Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo

CHAPTER II

EVALUATION OF THE PHOSPHORUS AVAILABILITY IN SOIL USING SLOW RELEASE SOURCE

ABSTRACT: Phosphorus is applied to the soil as a protonated form H_2PO_4^- (predominant in acid soils), HPO_4^{2-} , or H_3PO_4 of the anion phosphate that is highly sensitive to pH and susceptible to the physico-chemical reactions that reduce its availability in Latossols. These adsorption and, or precipitation reactions and type of precipitate determine the phosphorus availability from soluble phosphates. A study was carried out in the field to quantify the remaining phosphorus, to estimate the maximum adsorption and phosphorus depletion of the Slow Release Monoammonium Phosphate (MAPSR) and Monoammonium Phosphate (MAP) at the Goiano Federal Institute, Rio Verde Campus - GO, after the 2014/2015 and 2015/2016 crops. The experimental design with four randomized blocks and 2 x 6 factorial scheme consisted of two sources of phosphorus (MAP and MAPSR) in doses of 0; 54; 108; 162; 216 and 270 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of P_2O_5 . The remaining phosphorus was determined after one hour of soil shaking in 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 solution containing 60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of P in the soil solution ratio of 1:10. The maximum adsorption capacity of P adsorption was estimated using linear models of Langmuir. To evaluate the residual phosphorus availability by means of nutrient depletion in the solution, successive extractions were carried out with the Mehlich I acid double extractor. All samples were submitted to the 11 extractions until the P contents reached stabilization. In the 2014/2015 crop, when MAP was used, there was an incremental linear adjustment with the maximum P-rem of 38.41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ determined with the highest dose (270 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of P_2O_5), indicating that part of the phosphorus remained in the soil and may have a residual effect for the next crop, be precipitated or adsorbed. Also in the 2014/2015 crop, when MAPSR was applied, there was a quadratic adjustment with the maximum value of remaining phosphorus (38.72 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) obtained with 134.25 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of P_2O_5 . The reduction of the remaining phosphorus after the dose of 134.25 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of P_2O_5 meant an increase in phosphorus adsorption power in the soil, even using higher doses of fertilizer. In the second crop, the increase of the phosphorus remaining with the P_2O_5 doses was linear with the highest increase per kg of P_2O_5 applied by MAP (0.0187 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) compared to MAPSR (0.0151 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). This result demonstrates that MAPSR leads to a lower increment of remaining phosphorus, and

may be related to increased productivity due to the higher uptake by plants. The results obtained in the successive extractions (Mehlich I) indicated that the highest values of the vegetal production components obtained with the MAPSR use in the 2014/2015 crop can be attributed to the greater residual effect of this source compared to the MAP, and this effect was intensified by the highest P_2O_5 dose. MAPSR releases phosphate anion slower than traditional MAP and there was reduction of soil P adsorption with the MAPSR application at the end of two crops.

KEY WORDS: monoammonium phosphate, Nitossolic Red Dystrophic Latosol, Mehlich I, sequential extraction, Maximum Phosphorus Adsorption Capacity

2.1 Introdução

O fósforo (P) é um nutriente muito estudado principalmente pela sua essencialidade para o sistema produtivo de espécies autotróficas (TAIZ & ZEIGER, 2013), baixa mobilidade no solo (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOUSA & LOBATO, 2004) e fonte natural finita (SCHOLZ & WELLMER, 2015; MARIN et al., 2016; WITHERS, et al., 2018). Sabe-se que a demanda por alimentos provavelmente dobrará nas próximas quatro décadas (RAY, et al., 2013; BERNARDO et al., 2014) e o Brasil ocupa um lugar de destaque na produção global de *commodities* para a matriz energética e fins alimentícios (LOPES & GUIMARÃES, 2016; WITHERS, et al., 2018). Assim, torna-se relevante estudar formas para aumentar a eficiência de uso do fósforo na agricultura.

O anion fosfato quando liberado no solo pelos fertilizantes, primeiramente é retido na superfície dos coloides por adsorção de esfera externa, mantendo o equilíbrio com o P em solução. Com o passar do tempo há o “envelhecimento” da ligação e ocorre a desidratação com a formação de complexos de esfera interna em que ocorrem ligações covalentes e iônicas entre o anion fosfato e a superfície dos coloides (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOUSA & LOBATO, 2004). Este mecanismo de adsorção específica diminui a disponibilidade do P para as plantas, reduzindo a eficiência dos fertilizantes (VALLADARES, 2003; SOARES e CASAGRANDE, 2009). A compreensão dos mecanismos de sorção e desorção são de grande interesse agrônomo e ambiental, constituindo a base para predição da biodisponibilidade dos nutrientes para as plantas e para a contaminação de águas (FREITAS et al., 2010).

Existem várias técnicas que aumentam a eficiência dos fertilizantes fosfatados como calagem, adoção de sistema de cultivo que favoreça a manutenção da matéria orgânica reduzindo os sítios de adsorção e sendo fonte de P e a tecnologia dos fertilizantes de liberação lenta (SOUSA, 2014). Estes fertilizantes agem inicialmente diminuindo o aporte do anion fosfato e reduzindo as perdas por precipitação com Ca, Fe e Al na solução do solo (NOVAIS & SMYTH, 1999). Ocorre que tais fertilizantes mantêm a liberação lenta durante o desenvolvimento da planta com suprimento constante, aumentando a eficiência de uso por unidade de P aplicado e conseqüentemente incrementando o efeito residual que reduz as perdas por adsorção

específica nas superfícies dos colóides do solo (SOUZA, et al., 2012; RODRIGUES, et al., 2013; SOUZA et al., 2014).

Neste sentido, a aplicação de fontes de liberação lenta seria uma ferramenta para aumentar a eficiência do uso do P pelas plantas, pelas perdas de fósforo por adsorção e, ou, precipitação. Além disso, aumentam o tempo de vida das fontes finitas, reduzindo o custo da nutrição fosfatada, contribuindo para a manutenção da segurança alimentar do mundo (RAY, et al., 2013; BERNARDO et al. 2014; SCHOLZ & WELLMER, 2015; MARIN et al., 2016; LOPES & GUIMARÃES, 2016; WITHERS, et al., 2018).

Assim, o presente trabalho objetivou avaliar em fonte fosfatada a ocorrência da liberação lenta de P através de extrações sucessivas e possível alteração da capacidade de adsorção de P no solo por meio do fósforo remanescente e pelos modelos matemáticos de Langmuir.

2.2 Material e métodos

As amostras de solo foram secas ao ar (TFSA), passadas em peneira de 2 mm de abertura, acondicionadas em sacos de polietileno, identificadas e armazenadas para análises. Foi realizada a análise de P remanescente em todas as profundidades das amostras, conforme procedimentos em Alvarez, et. al., (2000). Em seguida, as demais análises químicas somente foram realizadas na profundidade em que houve variação significativa do P-rem em função dos tratamentos. Assim, foi realizada a avaliação do P disponível na profundidade de 0 a 0,05 m com o extrator Mehlich I (MEHLICH, 1953). Para a determinação colorimétrica do P extraído adicionou-se molibdato de amônio ao extrato para reagir com o fosfato da solução formando o complexo fosfomolibdico de cor azul obtido após redução do molibdato com ácido ascórbico.

A forma de P determinada por essa técnica é o ortofosfato (BORTOLON & GIANELLO, 2010). O extrator de Mehlich I foi escolhido por ser indicado para avaliar a disponibilidade de P em solos sem adubação e com aplicação de adubos fosfatados, além disso, para altos teores de P no solo, o extrator duplo ácido Mehlich I apresenta alta eficiência (GATIBONE et al., 2002; EBERHARDT et al., 2008; EMBRAPA, 2009). E como neste estudo não foi utilizada fonte contendo fosfatos monocálcicos, o extrator Mehlich I não poderia superestimar o teor de P disponível porque o referido extrator é eficiente em extrair P ligado a cálcio (NOVAIS & SMYTH, 1999).

As extrações sucessivas de P com o extrator duplo ácido Mehlich I (EMBRAPA, 2009), análises de Fósforo Remanescente (P-rem.), Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo e Energia de Ligação (ALVAREZ, et al, 1999) das amostras foram realizadas no laboratório de Química Agrícola, no IF/goiano, Campus Rio Verde - GO. Não houve período de repouso da amostra de solo/solução entre uma extração sucessiva e outra (RHEINHEIMER, 2000; 2003; 2008). Todas as amostras foram submetidas a 11 extrações sequenciais com Mehlich I para dessorver o fósforo lábil, ou seja, até que os teores de P atingissem a estabilização.

O P-rem foi determinado na solução de equilíbrio obtida após agitação de uma amostra de solo de 2,5 cm³ com 25mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de P, durante 1h. Os valores de P-rem serviram de base para a determinação das doses utilizadas na análise da CMAP (ALVAREZ et al., 2000). Para os valores de Prem foram utilizados ajustes de modelos em função das doses de P₂O₅ e comparação por contraste com a dose 0 (zero).

Na determinação da Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo e Energia de Adsorção (Alvarez, et al., 1999) foram transferidos 2,5 cm³ de solo para tubos de centrífuga de 50 mL de capacidade com 25 mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ contendo concentrações de P calculadas conforme procedimentos em Alvarez & Fonseca, (1990). Após 24horas de agitação, as amostras foram centrifugadas a 4.000 rpm por 5 minutos e filtradas. Os dados de P adsorvido e as concentrações de P das soluções de equilíbrio foram ajustadas à equação de Langmuir (1918). Os ajustes realizados em duas regiões tiveram a equação ajustada em modelo linear único conforme Novais & Smyth (1999) e equação 1 abaixo:

$$C/(x/m)(gL^{-1}) = \frac{1}{(a'b')} + \left(\frac{1}{b'}\right)C + \frac{1}{(a''b'')} + \left(\frac{1}{b''}\right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

x/m = Fósforo sorvido ao solo (mg P (x)/g solo (m));

a = constante relacionada à energia de ligação do P (L mg⁻¹);

b = CMAP do solo (mg g⁻¹), e

C = concentração de P na solução de equilíbrio (mg L⁻¹).

Todas as avaliações e análises químicas foram realizadas no laboratório de Química Agrícola, no IF Goiano, Campus Rio Verde - GO. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e ajuste de modelos matemáticos.

2.3 Resultados e discussão

O P remanescente (Prem) após a safrinha 2015 e safra e 2015/2016 variou em função das doses de P_2O_5 somente nas profundidades de 0 a 0,05 m (Figuras 1A, B e C). Após a safrinha 2015 o Prem nas profundidades de 0,05 a 0,10 e de 0,10 a 0,20 obtiveram valores médio de $35,25 \text{ mg dm}^{-3}$. Após a segunda safra os valores médios de Prem nas profundidades de 0,05 a 0,10 e de 0,10 a 0,20 obtiveram valores médios de $35,6 \text{ mg dm}^{-3}$. O efeito dos tratamentos somente na camada de 0 a 0,05 m é explicada pela aplicação superficial dos fertilizantes e a baixa mobilidade do P no solo (NOVAIS & SMYTH, 1999).

O Prem é um indicativo utilizado para descrever a capacidade de adsorção de P pelos solos sendo também uma tecnologia utilizada para a interpretação e recomendação de adubação fosfatada para solos sob cerrado (SOUSA & LOBATO, 2004) e para o estado de Minas Gerais (CANTARUTTI; ALVAREZ; RIBEIRO; 1999). Assim, com base nesse conhecimento, as demais análises de extração sequencial de P e determinação da capacidade máxima de adsorção de P no solo foram realizadas somente na profundidade de 0 a 0,05 m.

Após a primeira safra não houve diferença do Prem entre as fontes de P, variando somente em função das doses de P_2O_5 (Figura 1 A). Houve incremento constante em função das doses. Isso é um indicativo de que nas altas doses há saturação dos sítios de adsorção, mantendo maior a concentração de P remanescente na solução de equilíbrio. Após a segunda safra, houve o mesmo comportamento do Prem entre as fontes e em função das doses de P_2O_5 (Figuras 1 B e C). Todavia, o incremento do Prem por unidade de P_2O_5 aplicado foi maior com o uso do MAP (0,0185) em relação ao MAPSR (0,0127). O menor incremento do Prem com o uso do MAPSR pode ser atribuído a menor taxa de liberação do anion fosfato do fertilizante.

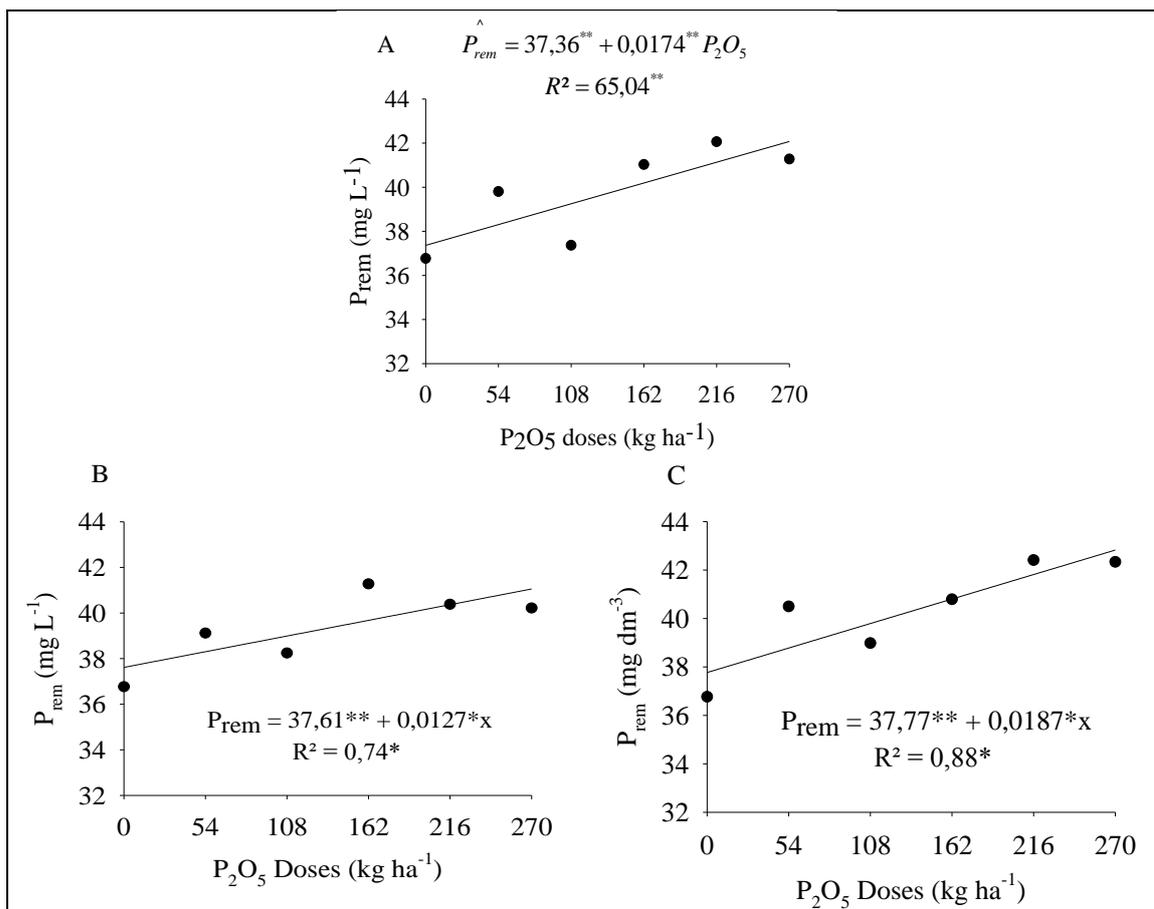


Figura 1 P remanescente (P_{rem}) (mg dm⁻³) em função das doses de P_2O_5 (kg ha⁻¹) na profundidade de 0 a 0,05 m após safrinha 2015 (média do MAP e MAPSR) (A) e após a safra 2015/2016 para o MAPSR (B) e MAP (C). **, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

A taxa de liberação de P dos fertilizantes, MAP e MAPSR, foi avaliada através das extrações sucessivas. As extrações sucessivas de P permitiram afirmar que após o cultivo da soja na safra 2014/2015 e do sorgo na safrinha 2015 houve efeito residual de P e que a aplicação do MAPSR, independente da dose, manteve valores mais altos de P no solo (Figuras 2 A a F). Observou-se que quanto maior a dose de P_2O_5 maior a distância da curva do MAPSR em relação ao MAP, ou seja, a depleção de P é menos intensa com o uso do MAPSR comparado ao MAP (Figuras 2 A a F). Os maiores valores dos componentes de produção vegetal obtidos com o uso do MAPSR podem ser atribuídos ao maior efeito residual dessa fonte (Capítulo 1). A Figura 2 confirma que a fonte MAPSR apresenta maior efeito residual comparado ao MAP, e esse efeito é mais pronunciado quando maior a dose de P_2O_5 .

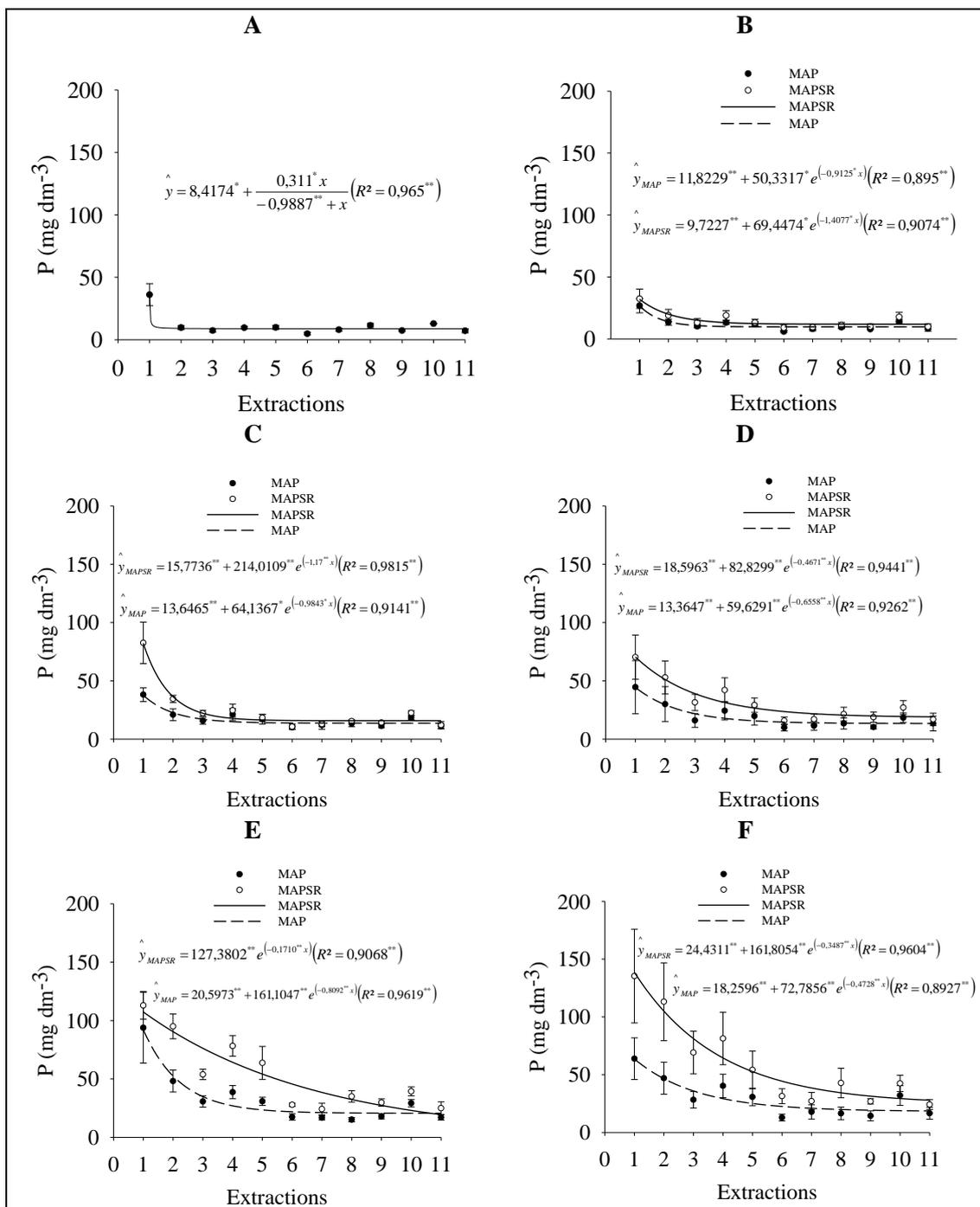


Figura 2 Extração sequencial de P (Mehlich I) das amostras de 0 a 0,05 m de profundidade e nas diferentes doses de P_2O_5 0 (A), 54 (B), 108 (C), 162 (D), 216 (E) e 270 (F) $kg\ ha^{-1}$ após a safrinha 2015 de sorgo forrageiro. **, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Nas extrações sucessivas após a segunda safra, o valor médio, sem aplicação de fertilizante fosfatado foi de $8,67\ mg\ dm^{-3}$ de P (Figura 3 A). A partir da dose de $54\ kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 (Figura 3 B) do fertilizante MAP houve aumento dos teores de P para próximo de $32,7\ mg\ dm^{-3}$ e do MAPSR para $19,7\ mg\ dm^{-3}$ com redução exponencial nas

extrações subsequentes. Esse incremento de 8,67 para 32,7 mg dm⁻³ de P disponível do MAP pode ser atribuído a solubilização de P mais rápido em relação ao MAPSR.

A partir da quarta extração os valores das extrações sequenciais estabilizaram-se em 23,4 com o MAP e 17,6 mg dm⁻³ com o MAPSR. Verificou-se que a estabilização de P disponível com a aplicação de MAP continuou com teores maiores que o MAPSR na dose de 108 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figura 3 C) confirmando até essa dose a liberação mais lenta do nutriente com essa fonte.

Com a dose de 162 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figuras 3 D), houve redução do P disponível com a aplicação da fonte MAP (13,9 mg dm⁻³) comparada com a do MAPSR (25,7 mgdm⁻³). As diferenças de comportamento observadas com as diferentes fontes de MAP sugerem que em solos de cerrado, as fontes de P de alta solubilidade podem não ser tão eficientes quanto as de menor solubilidade, quando comparado o MAP com o MAPSR. Esta viabilidade foi corroborada no trabalho de Machado & Souza (2012) em solos da região do Alto Paranaíba - MG com diferentes texturas e doses crescentes de fosfato monoamônico (MAP) de liberação lenta. Os autores concluíram que houve aumento da disponibilidade desta fonte ao longo do tempo, sendo o efeito mais acentuado em solos argilosos.

Não houve diferença com o uso da dose de 216 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Figuras 3 E) entre as fontes fosfatadas. A semelhança de comportamento entre o MAP e o MAPSR sugeriu que houve saturação de todos os sítios de troca na interface solo-solução. (Figuras 1 B e C). Pelos dados estimados pelos modelos (Figuras 1 C e D) os valores de Prem com a aplicação de 216 kg ha⁻¹ de P₂O₅ são de 41,8 e 40,1 mg dm⁻³ quando aplicado o MAP e o MAPSR, respectivamente.

As extrações de P das amostras contendo 270 kg ha⁻¹ de P₂O₅ de MAP e MAPSR (Figura 3 F) estabilizaram-se com os teores de 19,4 e 25,3 mg dm⁻³ de P, respectivamente. Ressalta-se, porém, os maiores valores sequenciais desde a primeira extração até o valor estabilizado de MAPSR demonstrou que a liberação gradual dessa fonte manteve maiores teores de P disponível no solo durante o crescimento inicial das plantas, seguido de fornecimento uniforme de acordo com a exigência nutricional, ao longo do ciclo de produção da cultura da soja proporcionando maior produtividade (Figura 3B, Capítulo 1) conforme resultados de produtividade também encontrados nos trabalhos com feijão-caupi (RODRIGUES et al., 2013); soja (SOUZA et al., 2012; SOUZA et al., 2014) e milho (FIGUEIREDO, et al., 2012.).

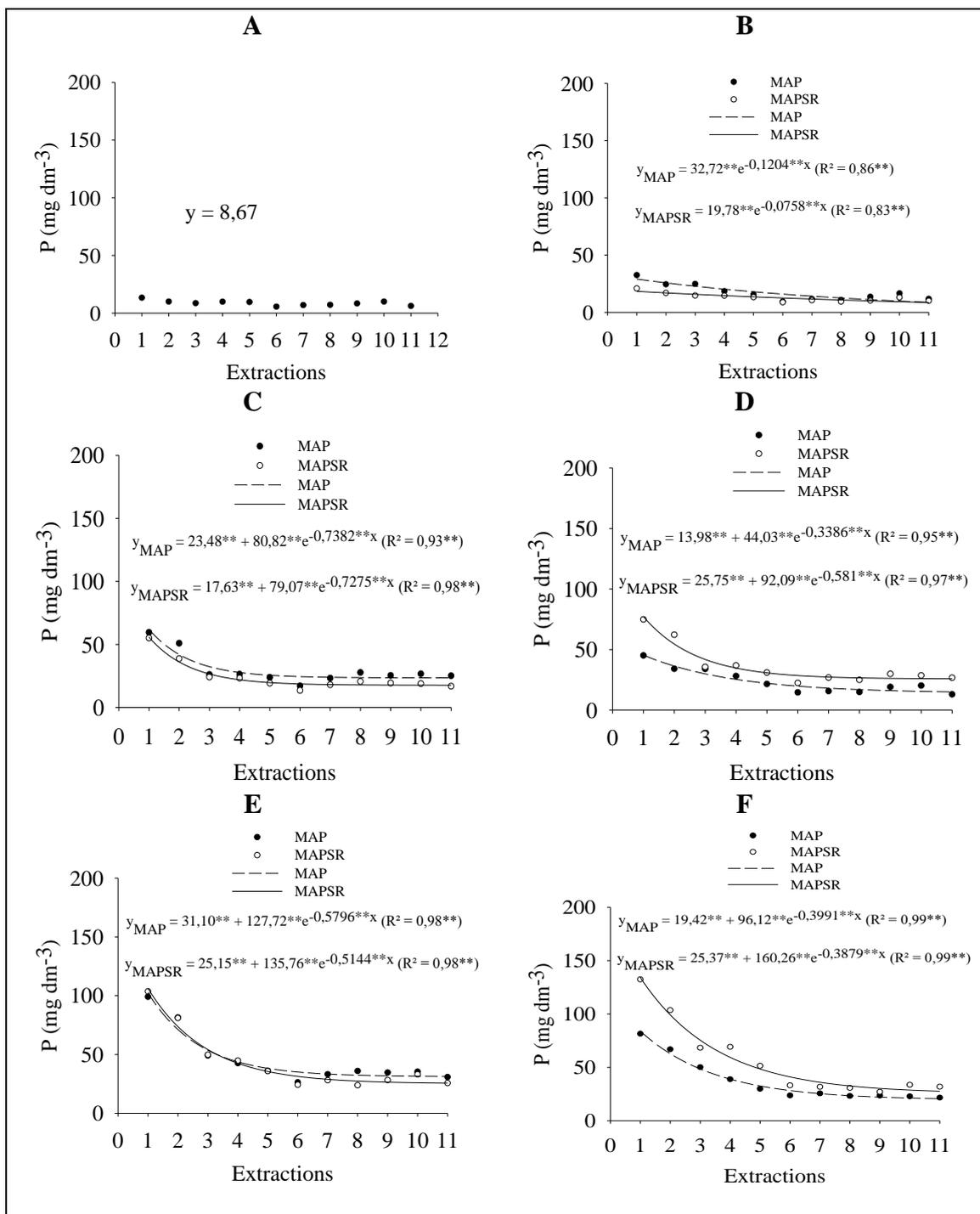


Figura 3 Extração sequencial de P (Mehlich I) das amostras de 0 a 0,05 m de profundidade e nas diferentes doses de P_2O_5 0 (A), 54 (B), 108 (C), 162 (D), 216 (E) e 270 (F) $kg\ ha^{-1}$ após a safra de soja 2015/2016. **, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

A menor solubilidade do MAPSR, também, pode proporcionar menores perdas de P por adsorção e, ou, precipitação. O que explica, também, maior eficiência das fontes de liberação lenta em longo prazo. Nas Figuras 2 e 3 foi possível observar que o MAPSR libera o P mais lentamente.

Existem três fases distintas relacionadas com a afinidade dos fosfatos a sítios de adsorção com energias de ligação diferentes denominadas regiões I, II e III que descrevem a adsorção de fosfatos ao solo. Para a equação de Langmuir, duas regiões de adsorção foram identificadas neste trabalho e ajustadas aos modelos. Os cálculos da CMAP e da energia de Ligação de fosfato (EL) foram realizados para cada região (ALVAREZ, 1982 e ALVAREZ; FONSECA, 1990) após cultivo da safrinha sorgo 2015 e soja safra 2015/2016 (Tabela 2).

A estimação da CMAP (mg g^{-1}) e EA (L mg^{-1}) por meio do ajuste linearizado da Isoterma de Langmuir para adsorção de P sem adição de fertilizante fosfatado em única região de 0 a 0,05 m de profundidade resultou na não linearidade entre as variáveis fósforo adicionado, remanescente e adsorvido pressupondo a existência de duas diferentes regiões gráficas com distintos valores de CMAP e de Energia de Ligação (Tabela 2).

Após a primeira coleta, e em função da identificação de duas regiões de adsorção de P, foi ajustado um único modelo linear através dos modelos das duas regiões conforme Novais & Smyth (1999) (Equação 1) (Tabela 2).

A identificação de duas regiões significa que existem dois conjuntos de sítios adsorptivos com características químico-físicas distintas (Novais & Smyth, 1999). Em geral, na primeira região há um sítio com baixa capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), mas com alta energia de ligação (EL) e na segunda região há baixa CMAP, entretanto com alta energia de ligação (ALVAREZ; FONSECA, 1990). As características físico-químicas distintas das duas regiões podem ser atribuídas a diferenças no complexo sortivo, como composição mineralógica da fração inorgânica do solo (SOARES & CASAGRANDE, 2009; SOUSA, 2014).

Como o solo estudado foi um Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico (EMBRAPA, 2013), na camada de 0 a 0,05 cm é representado pelo horizonte A moderado. Todavia, antes do plantio da safra 2014/2015 foi realizada gradagem na profundidade de 0 a 0,2 m de profundidade. Com isso, houve mistura entre o horizonte A moderado e o horizonte nitossólico. Em geral o horizonte nitossólico, pode conter desde oxidróxidos de ferro e alumínio e minerais silicatados lixiviados do horizonte superficial e depositados sobre a estrutura no horizonte nitossólico formando a cerosidade nítica (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOARES & CASAGRANDE, 2009). Essa complexidade mineralógica pode originar comportamentos distintos no complexo sortivo, gerando reações de superfície com características bem distintas.

Na Tabela 2 observa-se que houve variação entre os valores obtidos da CMAP. A CMAP média obtida com a aplicação das doses do MAP foi de $0,52 \text{ mg g}^{-1}$ e a média obtida com a aplicação das doses de MAPSR de $0,70 \text{ mg g}^{-1}$. Assim, após o cultivo do primeiro ano é possível afirmar que a CMAP é maior após a aplicação do MAPSR. Essa maior CMAP com aplicação do MAPSR pode ser explicada pela maior absorção de P pelas plantas, por apresentarem maior produção (Capítulo 1) ou mesmo pela menor taxa de liberação de fósforo dessa fonte, conforme discutido anteriormente (Figuras 2 e 3).

Após o segundo cultivo, soja safra 2015/2016, a CMAP média obtida com a aplicação das doses do MAP foi $0,26 \text{ mg g}^{-1}$, bem maior que a média obtida com a aplicação das doses de MAPSR ($0,09 \text{ mg g}^{-1}$). O resultado foi inverso ao obtido no primeiro ano. Este resultado pode ser atribuído ao maior efeito residual do MAPSR, que liberou o P lentamente no primeiro ano, fazendo com que ocorra maior disponibilidade ao longo do tempo, com conseqüente ocupação dos sítios de adsorção. A maior ocupação dos sítios de adsorção do primeiro para o segundo ano é observada pela redução significativa da CMAP entre as épocas de colheita, quando utilizado o MAP ($0,52$ para $0,26 \text{ mg g}^{-1}$) e o MAPSR ($0,70$ para $0,09 \text{ mg g}^{-1}$).

O aumento do P disponível se correlaciona diretamente com o aumento do Prem (Figura 4 A), ou seja, quanto maior o P disponível, pelo extrator Mehlich I, duplo ácido diluído, maior o valor de Prem. O maior valor de Prem está correlacionado com redução do potencial de adsorção de P no solo. Esta é uma relação indireta, pois os sítios adsorptivos podem ter características distintas mudando tanto a capacidade de adsorção como a energia de ligação em função de características mineralógicas do solo (NOVAIS & SMYTH, 1999). Para os dados obtidos no presente trabalho não houve correlação entre o Prem e a CMAP.

O maior teor de P Mehlich I obteve correlação negativa com a CMAP (Figura 4 B). Com isso, pode se inferir que quando maior o P disponível, pelo extrator duplo ácido diluído, menor a capacidade de adsorção de P pelo solo. Isso é explicado pela ocupação dos sítios de adsorção pelo P residual de uma safra para outra, como mostrado na Tabela 2. O coeficiente de correlação mais baixo entre o P Mehlich e a CMAP pode ser atribuído ao fato que o P Mehlich I ser capaz de extrair o P ligado a Ca e nos estudos de cinética de adsorção de P, o termo adsorção relaciona-se com o P adsorvido às partículas dos colóides e ao P precipitado com o Ca na solução do solo (Novais & Smyth, 1999).

Em geral, pode-se afirmar que com o uso do MAPSR há liberação mais lenta do anion fosfato do que com o MAP (Figuras 3 e 4), e que ao longo do tempo pode reduzir significativamente a perda de P por sorção, (adsorção mais precipitação), como verificado pela redução da CMAP (Tabela 2) e com economia de fertilizante e maior produção (Capítulo 1), alcançando assim o objetivo de maior segurança alimentar com o aumento da eficiência de fertilizantes de liberação lenta. A CMAP de $1,0 \text{ mg g}^{-1}$ de um solo (dreno) significa uma adsorção de 4600 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Uma forma de aplicação das fontes solúveis de P sugerida para amenizar a adsorção para solos com CMAP maior ou igual a $1,0$ é a aplicação localizada de P (KER, 1996; VAN RAIJ, 2011).

Figura 4 Correlação entre o P Mehlich I (mg dm^{-3}) versus os teores de P remanescente (Prem) (mg dm^{-3}) (A) e a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) (mg g^{-1}) (B). **, *Significativo pelo teste de F a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

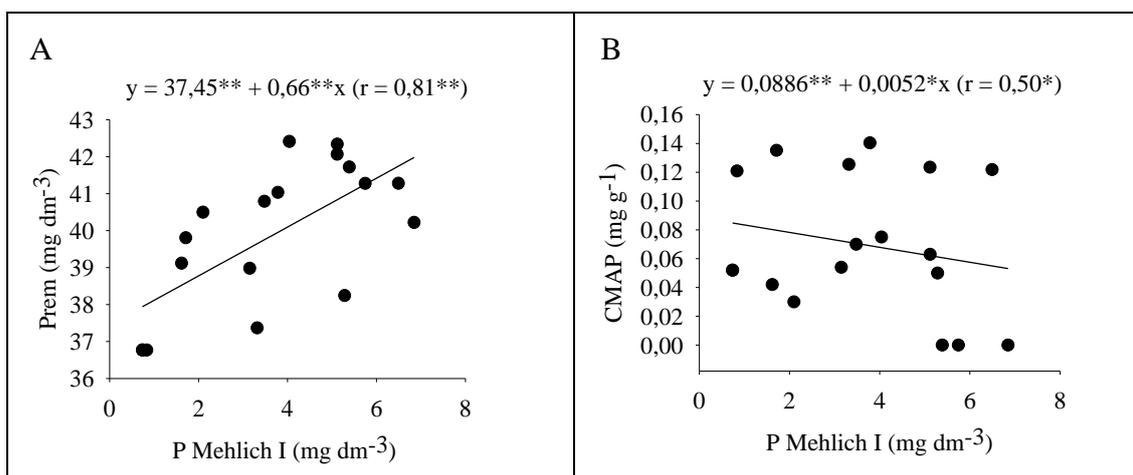


Tabela 2 Equações lineares das isotermas de Langmuir somadas as duas regiões $C/(x/m)(gL^{-1}) = \frac{1}{(a'b)} + \left(\frac{1}{b}\right)C + \frac{1}{(a''b'')} + \left(\frac{1}{b''}\right)C$, e a capacidade máxima de adsorção de ânion fosfato (CMAP) ($mg\ g^{-1}$) em função de doses ($kg\ ha^{-1}$) e fontes de fósforo (MAP e MAPSR) em amostras de Latossolo Vermelho Nitossólico distrófico após cultivo do sorgo safrinha 2015 e soja safra 2015/2016.

Fonte	Dose	Equação de Regressão	CMAP ($mg\ g^{-1}$)
Após o Cultivo do Sorgo Safrinha 2015			
	0	$C/(x/m) = \frac{1}{(2,00)} + \left(\frac{1}{0,16}\right)C + \frac{1}{(0,04)} + \left(\frac{1}{0,47}\right)C$	0,64
	54	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,80)} + \left(\frac{1}{0,19}\right)C + \frac{1}{(0,58)} + \left(\frac{1}{0,30}\right)C$	0,49
	108	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,67)} + \left(\frac{1}{0,18}\right)C + \frac{1}{(0,26)} + \left(\frac{1}{0,30}\right)C$	0,48
MAP	162	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,13)} + \left(\frac{1}{0,22}\right)C + \frac{1}{(0,04)} + \left(\frac{1}{0,36}\right)C$	0,59
	216	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,61)} + \left(\frac{1}{0,17}\right)C + \frac{1}{(0,16)} + \left(\frac{1}{0,27}\right)C$	0,44
	270	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,65)} + \left(\frac{1}{0,19}\right)C + \frac{1}{(0,04)} + \left(\frac{1}{0,31}\right)C$	0,50
	54	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,20)} + \left(\frac{1}{0,30}\right)C + \frac{1}{(0,14)} + \left(\frac{1}{0,31}\right)C$	0,61
	108	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,13)} + \left(\frac{1}{0,22}\right)C + \frac{1}{(0,04)} + \left(\frac{1}{0,36}\right)C$	0,59
MAPSR	162	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,36)} + \left(\frac{1}{0,19}\right)C + \frac{1}{(0,02)} + \left(\frac{1}{0,76}\right)C$	0,95
	216	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,30)} + \left(\frac{1}{0,17}\right)C + \frac{1}{(0,02)} + \left(\frac{1}{0,84}\right)C$	1,01
	270	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,46)} + \left(\frac{1}{0,16}\right)C + \frac{1}{(0,26)} + \left(\frac{1}{0,29}\right)C$	0,45
Após o Cultivo da Safra Soja 2015/2016			
	0	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,32)} + \left(\frac{1}{0,10}\right)C + \left(\frac{1}{0,10}\right)C$	0,21
	54	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,31)} + \left(\frac{1}{0,09}\right)C + \left(\frac{1}{0,04}\right)C$	0,14
	108	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,09)} + \left(\frac{1}{0,09}\right)C + \frac{1}{(0,009)} + \left(\frac{1}{0,14}\right)C$	0,22
MAP	162	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,50)} + \left(\frac{1}{0,09}\right)C + \frac{1}{(0,012)} + \left(\frac{1}{0,29}\right)C$	0,38
	216	$C/(x/m) = \frac{1}{(-0,08)} + \left(\frac{1}{0,11}\right)C + \left(\frac{1}{0,24}\right)C$	0,35
	270	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,03)} + \left(\frac{1}{0,11}\right)C + \left(\frac{1}{0,15}\right)C$	0,26
	54	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,47)} + \left(\frac{1}{0,08}\right)C + \frac{1}{(1,30)} + \left(\frac{1}{0,09}\right)C$	0,17
MAPSR	108	$C/(x/m) = \frac{1}{(0,52)} + \left(\frac{1}{0,08}\right)C + \frac{1}{(0,008)} + \left(\frac{1}{0,13}\right)C$	0,20
	162	Sem ajuste	0,00
	216	Sem ajuste	0,00
	270	Sem ajuste	0,00

2.4 Conclusões

Com os resultados obtidos é possível concluir que o MAPSR libera anion fosfato mais lento que o MAP tradicional e que há redução de adsorção de P no solo com a aplicação do MAPSR ao final de duas safras.

2.5 Referências bibliográficas

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.25, p.27-33. (Boletim Informativo).

ALVAREZ, V. H. **Capacidade máxima de adsorção defosfatos: práticas de avaliação da fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa: UFV, 1987.

ALVAREZ, V. H.; FONSECA, D. M. **Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 14, n. 1, p. 49-55, 1990.

BERNARDO, B.N.*et al.* **When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil**. Global Environmental Change. Volume 28, September 2014, Pages 84-97.

BORTOLON, L. & GIANELLO, C. **Fósforo extraído pela solução de Mehlich-1 determinado por colorimetria e ICP em solos do sul do Brasil**. R. Bras. Ci. Solo, 34:263-268, 2010.

EBERHARDT, D. N.; VENDRAME, P. R. S.; BECQUER, T; GUIMARÃES, M. F. **Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em Latossolos sob pastagens no cerrado**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:1009-1016, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3rd edition Embrapa Solos. Rio de Janeiro, Brazil.

EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de Análise de Químicas de Solo, Plantas e Fertilizantes**. Brasília 2ª. ed. rev. ampl. - Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.

FIGUEIREDO, C.C; BARBOSA, D.V; OLIVEIRA, S.A; MARCELO FAGIOLI, M E SATO, J. H **Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e parâmetros morfológicos de milho**. Rev. Ciênc. Agron., v. 43, n. 3, p. 446-452, jul-set, 2012.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. RHEINHEIMER, D. S. & SAGGIN, A. **Quantificação do fósforo disponível por extrações sucessivas com diferentes extratores em Latossolo vermelho distroférico.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 26:1023-1029, 2002

HINSINGER, P. **Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review.** Plant and Soil 237: 173–195, 200.

KER, J. C.; FONTES, M. P. F.; SOUZA, A. R.; RESENDE, M. **Adsorção de fósforo em alguns solos latossolicos: relação entre mineralogia e efeito da calagem.** Rev. Ceres, Viçosa, 43:216-226, 1996

LANGMUIR, I. **The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum.** J. Am. Chem. Soc., 1918, 40 (9), pp 1361–1403.

LOPES, A.S. & GUIMARÃES G. L.R. . **Chapter One - A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil.** Advances in Agronomy. Volume 137, 2016, Pages 1-72.

MACHADO V. J.; SOUZA, C. H. E. **Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato Monoamônico de liberação lenta.** Biosci. J. Uberlândia, v. 28, supplements 1, p. 1-7, Mar. 2012

MARIN F. R., MARTHA, G. B., CASSMAN, K. G., Grassini P.; **Prospects for Increasing Sugarcane and Bioethanol Production on Existing Crop Area in Brazil,** BioScience, Volume 66, Issue 4, 1 April 2016, Pages 307–316.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories.** Raleigh, University of North Carolina, 1953.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. **Fósforo.** In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. 15 **Fertilidade do Solo.** Viçosa, SBCS, 2007. 1017p

RAY, D. K., MUELLER, N. D., WEST, P. C., FOLEY, J. A. & MEYBECK, A. **Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050.** PLoS One 8, (2013).

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

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos.** 2000. 210p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. & CONTE, E. **Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos.**R. Bras. Ci. Solo, 27:41-49, 2003

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação.** Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG - Viçosa – 1999.

RIBEIRO, V. J., et al. **Produtividade de soja sob Plantio Direto em Resposta a Adubação Polimerizada.** XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 28 de julho A 2 de agosto de 2013. Costão do Santinho Resort. Florianópolis-SC.

RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação.** Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG - Viçosa – 1999.

RODRIGUES, C. et al. **Desempenho do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*(L) Walp) com doses crescentes de fertilizante fosfatado polimerizado.**XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 28 de julho a 2 de agosto de 2013. Costão do Santinho Resort. Florianópolis – SC.

SCHOLZ, R. W. & WELLMER, F. W. **Losses and use efficiencies along the phosphorus cycle. Part 1: Dilemmata and losses in the mines and other nodes of the supply chain.**Resources, Conservation and Recycling. Volume 105, Part B, December 2015, Pages 216-234.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C. **Adsorção e modelos.** In: Tópicos em Ciência do solo. Viçosa-MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v.6, p. 61-184.

SOUSA, D. M. G. Fósforo. In **Boas Práticas para uso eficiente de fertilizantes.** Piracicaba SP, 2014.

SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E.; REIN, A.T. **Adubação fosfatada.** In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação.** 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUZA, E.D.; et al. **Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long-term tillage systems.**SoilandTillage Research, 139:28–36, 2014.

SOUZA, et al. **Eficiência agronômica de fosfatos de rocha em solo com elevado teor de cálcio trocável.**Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 1816-1825, dez. 2014.

SOUZA, J. R., et al. **Eficiência do fósforo revestido com polímeros na cultura da soja.** Acta Iguazu, Cascavel, v.3, n.4, p. 1-9, 2014

SOUZA, J.R et. al. **Avaliação da eficiência agronômica e viabilidade técnica da utilização de kimcoat- P na cultura da soja.** VI CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA. Cuiabá, MT – 2012.

TAIZ, L. e ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**.5 ed. - Porto Alegre: Artmed. 2013. 918 p.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. **Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa**. *Bragantia*, Campinas, v.62, n.1, p.111-118, 2003.

VAN RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

WITHERS, et. al. **Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture**. *Scientific Reports*. Volume 8, Article number: 2537(2018).

CONCLUSÃO GERAL

Com os resultados obtidos no trabalho em Latossolo Vermelho Distrófico Nitossólico concluiu-se que:

- 1) O MAPSR libera anion fosfato mais lento que o MAP tradicional e há redução de adsorção de P no solo com a aplicação do MAPSR ao final de duas safras.
- 2) As maiores retenções de P por adsorção ocorrem durante o período entre safras, em que acontece a desidratação das interações eletrostáticas entre o P e a superfície dos coloides.
- 3) Assim, é interessante reavaliar estas reações de sorção de fósforo ao solo de forma semelhante após esse período, e até mesmo, durante vários anos de cultivo.