

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
CAMPUS JATAÍ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**SORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE
CERRADO**

Flávio Araújo Pinto

Eng. Agrônomo

JATAÍ - GOIÁS - BRASIL

Julho de 2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
CAMPUS JATAÍ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**SORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE
CERRADO**

Flávio Araújo Pinto

Orientador: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza

Co-orientadores: Prof. Dr. Helder Barbosa Paulino

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

JATAÍ - GOIÁS - BRASIL

Julho de 2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

P659s Pinto, Flávio Araújo.
Sorção e dessorção de fósforo em solos de Cerrado
[manuscrito] / Flávio Araújo Pinto. - 2012.
46 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza; Co-orientadores: Helder Barbosa Paulino; Marco Aurélio Carbone Carneiro

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, 2012.

Bibliografia.

1. Solo – Cerrado – Goiás. 2. Adsorção – Fósforo.

CDU: 631.41

FLÁVIO ARAÚJO PINTO

TÍTULO: "SORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE CERRADO".

Dissertação DEFENDIDA e APROVADA em 03 julho de 2012, pela Banca Examinadora constituída pelos membros:



Prof. Dr. Edicarlos Damacena de Souza
Orientador - CAJ/UFG



Prof. Dr. Frederico Costa Beber Vieira
UNIPAMPA



Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro
CAJ/UFG

Jataí - Goiás
Brasil

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

FLÁVIO ARAÚJO PINTO – Filho de Rubens Araújo Freitas e Ana-Beatriz Alves Pinto Araújo, nascido no dia 20 de agosto de 1987 no município de Jataí – GO, iniciou a graduação na Universidade Federal de Goiás (UFG) em agosto de 2006, sendo bolsista de iniciação científica por dois anos e recebendo o título de Engenheiro Agrônomo em 2010. Ingressou no mestrado em março de 2011 pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia da UFG, obtendo o título de mestre em julho de 2012.

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais e avós pela formação concedida desde a alfabetização e pelos incentivos e apoios proporcionados durante a graduação e pós-graduação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela oportunidade concedida.

Aos meus pais Rubens e Ana-Beatriz, meu irmão Lázaro e a minha avó Beatriz pelo incentivo, apoio e compreensão durante o mestrado.

Ao professor Dr. Edicarlos Damacena de Souza pela amizade, orientação, exemplo profissional e ao incentivo para o mestrado e ao doutorado.

Ao professor Dr. Helder Barbosa Paulino pela amizade, apresentação da Ciência do Solo, orientação na iniciação científica e co-orientação no mestrado.

Ao professor Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro pela convivência desde a graduação e co-orientação no mestrado.

Ao professor Dr. Clístenes Willians Araújo Nascimento pela participação da qualificação e pelas sugestões ao trabalho.

Ao programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Goiás pela formação proporcionada e oportunidades concedidas.

A todos os colegas de pós-graduação, pela convivência, amizade, companheirismo e incentivo ao doutorado, em especial ao Leonardo, Diego, Franciane, Geanderson, João, Caio, Flávia e Dorotéia.

Ao técnico do laboratório de solos, Marcos Humberto Silva de Assis pela amizade e ensinamentos proporcionados no decorrer dos trabalhos.

A CAPES pela bolsa fornecida durante o mestrado.

Aos meus amigos Alex, Everton e Tiago, pela amizade e companheirismo.

E a você por prestigiar a minha dissertação.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL	3
2.1. Solos de Cerrado	3
2.2. Fósforo	5
2.2.1. Comportamento do Fósforo no solo	6
2.3. Sorção e dessorção de fósforo	8
2.4. Referências	12
3 – ARTIGO: SORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO	17
RESUMO	17
SUMMARY	18
INTRODUÇÃO.....	18
MATERIAL E MÉTODOS	20
RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
CONCLUSÕES.....	31
LITERATURA CITADA	32
CONSIDERAÇÕES FINAIS	36

LISTA DE ABREVIATURAS

Al – Alumínio

Ca – Cálcio

C_{MAP} – Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo

CTC_{7,0} (T) – Capacidade de Troca de Cátions em pH 7,0

CTC_{efetiva} (t) – Capacidade de Troca de Cátions no pH apresentado pelo solo

EA – Energia de Adsorção

FCP – Fator Capacidade de Fósforo

Fe – Ferro

Fe_d – Ferro ditionito

Fe_o – Ferro oxalato

Fe_t – Ferro total

LVA – Latossolo Vermelho Amarelo

LVD₁ – Latossolo Vermelho distrófico

LVD₂ – Latossolo Vermelho distrófico

LVD₃ – Latossolo Vermelho distrófico

LVwf – Latossolo Vermelho acriférico

MO – Matéria Orgânica

NQ – Neossolo Quartzarênico

P – Fósforo

PCZ – Ponto de Carga Zero

PH₁ – Plintossolo Háplico (topo do murundum)

PH₂ – Plintossolo Háplico (base do murundum)

V – Saturação por bases

SORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS DE CERRADO

RESUMO – A sorção do fósforo (P) pelo solo é um fenômeno que varia em função das características do solo, sua intensidade e magnitude, tornando-o fonte ou dreno de P. O objetivo do presente estudo foi quantificar a sorção e dessorção de fósforo e avaliar as interações entre estes e os atributos físicos e químicos dos solos. O estudo foi realizado em sete solos originalmente sob vegetação de Cerrado e em áreas não antropizadas. Os valores de sorção obtidos foram ajustados à isoterma de Langmuir, sendo avaliados a Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), a Energia de Adsorção (EA) e o Fator Capacidade de Fósforo (FCP) calculado em função dos teores de P-sorvido e P-dessorvido. Os valores da CMAP foram classificados como altos na maioria dos solos, variando de 283 até 2635,7 mg kg⁻¹ e se correlacionaram com os teores de matéria orgânica, argila, silte, areia, saturação por bases e pH. O fator capacidade de fósforo foi maior nos solos onde se obteve maior capacidade máxima de adsorção de fósforo. A utilização de somente um atributo de solo, o teor de argila, como critério de classificação para recomendação da adubação fosfatada apresenta-se suscetível a erros, devendo utilizar-se mais fatores para um manejo adequado do fósforo no solo.

Palavras-chave: Capacidade de adsorção de fósforo, Langmuir, solos nativos.

PHOSPHORUS SORPTION AND DESORPTION IN BRAZILIAN CERRADO SOILS

ABSTRACT – Phosphorus sorption the soil is a phenomenon that varies depending on soil characteristics, their intensity and magnitude makes the soil a source or drain of P. The aim of this study was to quantify the sorption and desorption and evaluate the interactions between the physical and chemical properties of soils and adsorption. The study was conducted in seven soils of the Brazilian Cerrado under native vegetation. Values of adsorption were fitted to the Langmuir isotherm, evaluated the Maximum P Adsorption Capacity (MPAC), the adsorption energy and P Capacity Factor (PCF) which was calculated according to the levels of P-adsorbed and P-desorbed. The values of maximum adsorption capacity of phosphorus were high in most soils, ranging from 283 up to 2635,7 mg kg⁻¹ and were correlated with soil organic matter, clay, silt, sand, base saturation and pH. The capacity factor of phosphorus was higher in soils where the maximum adsorption capacity of phosphorus was also higher. The use of only one attribute of soil, clay content, as a classification criterion for the recommendation of phosphate fertilizer is susceptible to errors and more factors should be used to proper management of soil phosphorus.

Keywords: Phosphorus adsorption capacity, Langmuir, native soils.

1 – INTRODUÇÃO

A expansão agrícola observada no Cerrado brasileiro nos últimos anos e o nível tecnológico aplicado estimularam a pesquisa nessas áreas, o que é observado pelo grande número de trabalhos desenvolvidos nos solos do Cerrado, principalmente os trabalhos visando a maior eficiência de utilização dos recursos esgotáveis. O mineral fósforo (P) compõe um destes recursos, sendo frequentemente estudado em busca de melhor entender a sua dinâmica nesses solos.

A complexidade dos fenômenos de sorção do P no solo e a grande afinidade com os componentes do solo interferem na disponibilidade desse nutriente para as plantas. Ocorrendo a sorção do P, a qual é compreendida pelos fenômenos de adsorção, precipitação e fixação, variando a intensidade com que o P se mantém ligado aos componentes do solo, podendo estes serem as argilas, principalmente com camadas 1:1, aos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, a matéria orgânica do solo e a alguns cátions livres como o Fe, Al e Ca.

Com isso, a composição mineralógica dos solos demonstram correlação com a quantidade de P sorvido (Lopes & Cox, 1979; Novais e Smyth, 1999; Valladares et al., 2003; Ranno et al., 2007). Essas características também interferem na intensidade que o P se liga ao solo, resultando em diferentes energias de ligação (EA), a qual se relaciona com a capacidade e intensidade de liberação deste P sorvido para a solução do solo. Esse comportamento é expresso pelo fator capacidade de P (FCP), o qual apresenta-se maior nos solos com maiores teores de argila e normalmente com as maiores capacidade máxima de adsorção de P (CMAP).

Devido ao comportamento do P no solo, apresentando baixos teores na solução do solo, principalmente nos solos mais intemperizados é indispensável a

reposição deste para a absorção do mineral pelos vegetais, tornando as características intrínsecas do solo um fator que influencia na recomendação da adubação fosfatada. Em busca de melhor entender a dinâmica apresentada pelos solos do Cerrado, principalmente os mais intemperizados que apresentam alta afinidade pelo P, o presente trabalho objetivou determinar a CMAP, a EA, o FCP e a dessorção de P de solos do Cerrado brasileiro, e verificar a correlação entre a CMAP e o FCP com os atributos químicos e físicos destes solos.

2 – ESTADO DO CONHECIMENTO ATUAL

2.1. SOLOS DE CERRADO

O Cerrado é o segundo maior Bioma brasileiro, estendendo por onze estados com área total de aproximadamente 2 milhões de km², representando 23,9% do território nacional. O estado de Goiás apresenta 97% do seu território coberto pelo Bioma Cerrado (IBGE, 2004). Neste Bioma predomina o clima tropical sazonal, apresentando inverno seco e verão chuvoso, com médias anuais de precipitação entre 1200 e 1800 mm e temperaturas com médias próximas a 25°C.

Os solos característicos do Cerrado apresentam-se distribuídos em diversas classes, sendo a maioria destes solos com características ácidas, altos teores de alumínio (Al³⁺), presença de óxidos de ferro, característicos das rochas de origem e determinantes das colorações amareladas e avermelhadas dos solos. A topografia desta região favoreceu o desenvolvimento da agricultura e da pecuária, em especial nos estados de Goiás e Mato Grosso. O predomínio de chapadões, com a presença de extensas áreas cobertas por Latossolos e o clima proporcionando elevadas precipitações, favoreceram o desenvolvimento da pecuária extensiva no início da exploração. Atualmente há intensificação da agricultura e pecuária em grande parte das áreas cultivadas, sendo conhecido atualmente como o celeiro brasileiro.

Os Latossolos representam 46% dos solos sob o Bioma Cerrado (Macedo, 1996) e 45% dos solos do estado de Goiás. Dois terços desses solos apresentam coloração avermelhada e predomínio de agricultura, principalmente na região Sudoeste do estado. O terço restante compreende principalmente as áreas com pecuária, sendo presente o Latossolo Vermelho Amarelo (SEPLAN-GO, 2011). Além dos Latossolos também são encontrados os Cambissolos, Argissolos, Nitossolos, Neossolos, Plintossolos e Gleissolos.

No estado do Mato Grosso ocorre uma maior diversidade de solos, apresentando 23 classes de solos, sendo 41,6% dos solos do estado classificados como Latossolos (EMBRAPA, 2012). Desses Latossolos é observado o predomínio do Latossolo Vermelho com 23,6%, seguido pelo Latossolo Vermelho Amarelo com 17,18%, além de outros Latossolos com menor representatividade.

Estes Latossolos do Cerrado apresentam uma homogeneidade das características físicas e químicas, apresentando-se profundos na maioria dos casos, portanto a variação de algumas características permite a divisão em sete tipos de Latossolos. Nos Latossolos são observadas algumas variações na fração argila, em função do material de origem, apresentando diferentes percentuais de caulinita, gibbsita, hematita e goethita. Com menor frequência outros minerais de argila podem ocorrer nesses solos, entretanto a maioria dos Latossolos apresentam caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Ker, 1997).

Na região do Cerrado também são encontradas áreas com a presença de Neossolos, as quais correspondem a 15,2% dos solos de Cerrado. Em Goiás, esses solos representam 3,6% do território (SEPLAN-GO, 2011). Os Neossolos apresentam uma camada superficial com matéria orgânica (originária da vegetação presente na área), os horizontes desses solos não apresentam diferenciação, apresentando profundidade superior a 1,5 m e podendo manter a característica arenosa até o contato lítico.

Diferentemente dos solos anteriores o Plintossolo Háptico apresenta concreções ferruginosas, plintitas, as quais originam as petroplintitas nas camadas subsuperficiais (1 a 2 m de profundidade). Essa formação ocorre devido às variações no nível do lençol freático destes solos, que permite que o ferro sofra oxidação e redução até a formação de uma forma mais estável, sendo primeiramente formada a plintita e com o passar do tempo a petroplintita, caso exista condições favoráveis. Esse solo ocorre principalmente na região dos covais no estado de Goiás, representando 3,8% dos solos do estado (SEPLAN-GO, 2011).

Os solos sob covais apresentam características peculiares, com elevações variando a altura entre 0,8 a 2 m e o diâmetro de 12 a 20 m (conhecidas como murundus). Em função da baixa infiltração influenciada pelo lençol freático superficial ocorre anualmente, no período chuvoso, o encharcamento da área da base dos

murundus. Nessas áreas a vegetação sofre alterações, apresentando uma flora hidrófila, essencialmente graminácea e tolerante ao alagamento na base dos murundus e a ocorrência de maior diversificação da vegetação no topo dos murundus, ocorrendo espécies arbóreas e arbustivas (Assis, 2011).

As inundações ocorridas nesses solos promovem aumento no valor do pH e a redução do Fe^{3+} para Fe^{2+} , reação que reduz a capacidade de adsorção de ânions (Pavan & Miyazawa, 1983). Isso possibilita a solubilização de parte do P ligado ao ferro. Efeito contrário ocorre quando o solo volta a ser aerado e os óxidos passam a apresentar menor cristalinidade, o que representa maior reatividade (Hernández & Meurer, 1998), proporcionando aumento na sorção do P.

A representatividade desses solos, em especial dos Latossolos, para a agricultura incentiva o desenvolvimento de pesquisas para melhor compreender o comportamento dos fertilizantes, principalmente os fertilizantes fosfatados, os quais apresentam altos níveis de interação com os componentes do solo.

2.2. FÓSFORO

O constante crescimento da população mundial e a preservação ambiental impulsionam o desenvolvimento de tecnologias na área agrícola, principalmente no melhoramento vegetal, tornando os vegetais mais produtivos. Portanto esses benefícios passaram a exigir que os solos apresentassem alta fertilidade, fato que é favorecido com a aplicação de fontes solúveis dos nutrientes ao solo. Entre os nutrientes aplicados se tem o P que apresenta baixa mobilidade no solo e grande capacidade de ser sorvido pelos minerais de argila e óxidos (Malavolta, 1976; Raij, 2011).

Devido à baixa disponibilidade do P nos solos, principalmente nos mais intemperizados, necessita-se da aplicação de elevadas doses do nutriente, o qual apresenta reservas limitadas e possível escassez ainda neste século (Gilbert, 2009). A qualidade do fosfato das reservas constitui outro limitante dessa adubação, em que as rochas podem apresentar-se em formações que resultem em alta ou baixa reatividade, apresentando elevada ou reduzida solubilização do P (Rajan et al., 1996). Quando as rochas apresentam baixa solubilidade do P torna-se necessário a

reação com ácidos (sulfúrico ou fosfórico) para o aumento da solubilização do P (formando o superfosfato simples e o superfosfato triplo respectivamente). Já nas rochas com elevada solubilidade do P, é observado alto percentual do P presente no mineral solúvel, possibilitando a disponibilidade de P para as culturas apenas com a aplicação da rocha diretamente ao solo.

No solo o P inorgânico, quando em solução, pode apresentar as seguintes formas iônicas: a) ácido ortofosfórico ($\text{H}_3\text{PO}_4^{3-}$) com predomínio em pH menor que 2,1; b) dihidrogenofosfato (H_2PO_4^-) predominando entre o pH 2,1 e 7,2, compreendendo a faixa de pH indicado aos vegetais; c) hidrogenofosfato (HPO_4^{2-}) predominando em pH básico entre 7,2 e 12 e; d) fosfato (PO_4^{3-}) com pH acima de 12 (Raij, 2011).

É possível verificar que a faixa de maior disponibilidade do P no solo ocorre dentro da faixa de pH 5 a 6, quando o P apresenta-se na forma de dihidrogenofosfato. Nesse pH ocorre a redução da precipitação de formas de P ligadas ao Al e também pela carga do íon que é menor nessa forma. Isso contribui com as argilas, que devido à carga variável, apresentam maior quantidade de cargas negativas neste pH, produzindo menor energia de atração do P pelos argilominerais do solo, ocorrendo a redução do potencial eletrostático do plano de adsorção (Haynes, 1984; Barrow, 1985). Novais & Smyth (1999) verificaram que metade da capacidade de sorção de P pelo solo pode ser fixada com até um mês de contato após à aplicação do mineral ao solo. Destacando-se a importância de se conhecer o comportamento do P em diferentes solos com relação à capacidade de sorção e dessorção desse elemento, possibilitando diferentes manejos, que promovam maior eficiência na sua utilização.

2.2.1. COMPORTAMENTO DO FÓSFORO NO SOLO

O mineral P no solo pode ser encontrado em diversas formas e frações (Figura 1), pode-se observar, partindo do P-solução que este pode ser suprido por duas fontes externas, sendo a fonte mineral e a fonte orgânica. A fonte mineral pode apresentar variações na solubilidade do P, sendo esta intrínseca do mineral, no caso dos fosfatos naturais esta solubilidade pode ser reduzida nos fosfatos de baixa

reatividade (fosfatos de Araxá e Patos) e maior solubilidade nos fosfatos de maior reatividade (fosfatos de Gafsa e Norte Carolina). Além dessas, se tem as fontes industrializadas que são oriundas de processos térmicos ou reações de ácidos com os fosfatos naturais de baixa reatividade, gerando fontes de alta solubilidade.

As fontes orgânicas também apresentam a capacidade de suprir o P do solo, portanto elas suprem o P solução ao serem mineralizadas. A mineralização da fonte orgânica ou a solubilização da fonte mineral produz aumento nos teores do P-solução, portanto esses teores são baixos, variando de 0,002 a 0,2 mg L⁻¹ (Fardeau, 1996) o que demonstra que o P aplicado ao solo não se mantém na solução do solo. Esse P é parcialmente imobilizado para a decomposição de resíduos vegetais quando estes resíduos apresentam baixos teores do mineral, ou retornam às formas estáveis pela retrogradação, devido as condições favoráveis.

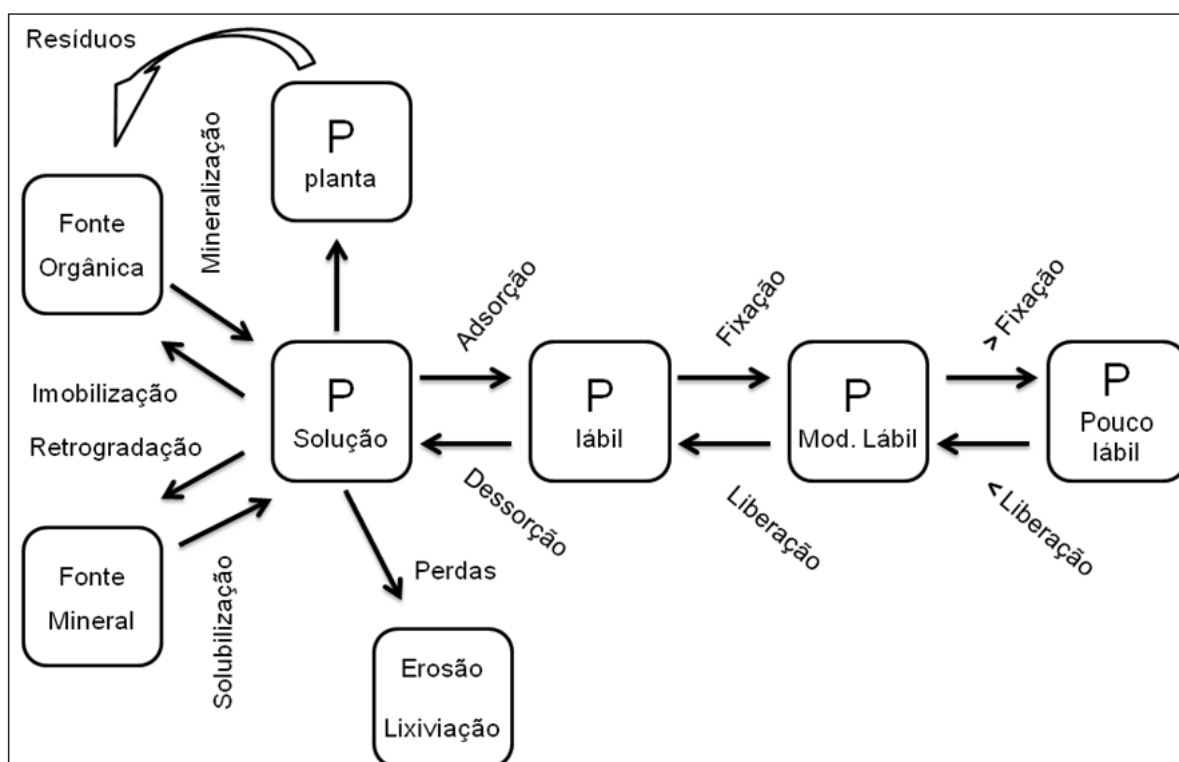


Figura 1: Comportamento do mineral fósforo no solo.

Quando não ocorre imobilização ou retrogradação, os elevados teores do P-solução movimentam para níveis de maior estabilidade, passando inicialmente à

fração lábil em pequeno tempo de contato com o solo (Gonçalves et al., 1985). É importante lembrar que a fração lábil é a principal responsável pelo suprimento do P-solução.

Após o aumento do tempo de contato ocorre o aumento da energia das ligações, promovendo o deslocamento do P para a direita (Figura 1) onde o mesmo pode chegar até frações pouco lábeis, sendo necessário um tempo maior que o período do ciclo das culturas para que ocorra a dessorção de parte desta fração, sendo a quantidade dessorvida por essa fração insuficiente para o suprimento das necessidades da cultura.

A capacidade dos solos sorverem o P permite que este apresente uma reserva do mineral, a qual tem importância fundamental ao suprimento do mesmo. No entanto, solos com menor capacidade de sorção de P podem apresentar problemas com perdas do mineral devido aos maiores teores de P-solução, permitindo a movimentação deste na solução do solo, quando comparado aos solos com maiores capacidades de sorção de P.

2.3. SORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO

As reações de sorção (erroneamente chamadas apenas de adsorção) ocorrem naturalmente nos solos, sendo definidas como as interações de íons em solução com a fase sólida do solo (óxidos, hidróxidos, argilominerais, carbonatos e matéria orgânica), portanto com intensidade variável devido às diferentes energias apresentadas pelos componentes dos solos (Hernández & Meurer, 1998; Guilherme et al., 2000; Valladares et al., 2003; Souza et al., 2006). A natureza e a energia dessas ligações permitem classificá-las em adsorção, fixação e precipitação, as quais juntas compõem o complexo de sorção, visto que quantificá-las separadamente é praticamente impossível.

A adsorção ocorre quando o íon fosfato (adsorvato) é sorvido pelo componente do solo (adsorvente) (Novais et al., 2007; Meurer, 2010). Esta ligação pode ocorrer com a formação de complexos de esfera externa, onde existe a presença de pelo menos uma molécula de água interpondo a ligação do adsorvato ao adsorvente, o que torna essa ligação pouco estável quando comparada às

demais. Com a desidratação desta ligação, o íon fosfato liga-se diretamente ao adsorvente, transformando a ligação de esfera externa em uma ligação de esfera interna. O P pode se ligar às hidroxilas dos adsorventes com uma ou mais ligações, caminhando para o estágio de fixação do P devido a maior força de atração entre o adsorvato e o adsorvente, visto que diferentemente das ligações de esfera externa agora as ligações são covalentes (Meurer, 2010).

A precipitação do P ocorre quando em reações químicas do íon no solo se forma um novo produto, com composição definida e baixa solubilidade (Sample et al., 1980). Com isso, pode-se formar fosfatos de ferro, alumínio e cálcio, sendo variáveis as quantidades de cada forma em função da disponibilidade dos cátions, que normalmente é influenciada pelo pH do solo. Em pH ácido ocorre o predomínio das formas de P ligadas ao Fe. Com a diminuição da acidez ocorre a redução destas formas de P e o surgimento de maiores teores das formas ligadas ao Al. Posteriormente com novo aumento do pH, estas também apresentam redução, sendo a faixa de pH de maior disponibilidade de P, que coincide com o pH adequado a maioria das culturas. Aumentando mais o pH, começando a apresentar o caráter básico, ocorre a ligação do P ao cálcio (Sharpley et al., 1995), ocorrendo o predomínio desta forma. Durante as alterações do pH são originados alguns minerais primários, como a strengita (Fe), variscita (Al) e hidroxiapatita, fluorapatita (Ca), estes minerais apresentam baixa solubilidade no pH em que se formam, portanto podem ser parcialmente solubilizados com a inversão do pH (Olsen & Khasawneh, 1980), portanto com o passar do tempo essas ligações podem apresentar maior estabilidade originando fosfatos naturais de baixa reatividade.

Os fenômenos de sorção do P sejam por adsorção ou precipitação ocorrem inicialmente com alta velocidade, tendendo à estabilidade com o passar do tempo e aumentando a quantidade de P sorvido (Sample, 1972). Este processo de ligação do P aos minerais promove a ocorrência e manutenção de baixos teores de P na solução do solo, variando de 0,002 a 2,0 mg L⁻¹ (Raij, 1991; Fardeau, 1996). Os menores valores são encontrados nos solos mais argilosos e os maiores valores nos solos mais arenosos, devido às diferentes concentrações de argila e oxidróxidos (Rolim Neto et al., 2004). Em consequência dos baixos teores de P na solução do solo é necessário a reposição destes teores pelo P lábil do solo, o qual encontra-se

ligado com baixa energia aos minerais do solo. Este P lábil apresenta maiores teores nos solos argilosos quando comparado aos teores dos solos arenosos.

Os baixos teores do P em solução implicam em maior necessidade de reposição dessa fração de P para a manutenção dos vegetais (Tidmore, 1930), segundo este autor esta reposição poderá ser superior a 1000 vezes o teor de P encontrado na solução do solo, variando em função das características intrínsecas de cada solo.

O processo de reposição destes teores é demonstrado pelos fatores quantidade (Q) e intensidade (I), sendo a intensidade do movimento do P sorvido ao solo (Fator Q) para o P em solução (Fator I) determinada pelo Fator Capacidade de P (FCP). O qual é obtido pelo coeficiente b_1 da equação de 2º grau, obtida pela tendência de dispersão dos pontos, entre o P dessorvido e o P sorvido nas diferentes concentrações de P adicionado para cada solo (Fox & Kamprath, 1970). Este fator relaciona à capacidade de cada solo repor o P solução e, comumente, é maior nos solos com maior Capacidade Máxima de Adsorção de P (CMAP) (Guilherme et al., 2000; Broggi et al., 2011).

Ranno et al. (2007) estudando 16 solos do Rio Grande do Sul encontraram correlação direta entre os teores de argila, Fe e matéria orgânica na capacidade máxima de adsorção de fósforo, demonstrando a influência da composição do solo na sorção de P. Guilherme et al. (2000) também encontraram correlação entre os teores de Fe e matéria orgânica com a CMAP nos solos de várzea avaliados, sendo observado maiores teores do FCP para estas maiores CMAP, demonstrando o maior potencial destes solos em suprir o P solução (Novais et al, 2007).

O manejo dos solos do Cerrado permite observar a necessidade da aplicação de maiores teores de fertilizantes fosfatados para a manutenção dos níveis de produção agrícola, devido ao grande volume de cargas presentes nesses solos, principalmente pelas cargas originárias dos óxidos e das argilas (Rolim Neto et al., 2004). Essa maior aplicação de fertilizantes ocorre em função da maior CMAP destes solos e conseqüentemente menores teores de P solução (Fator I), caracterizando a maioria destes solos mais intemperizados como drenos do mineral.

Bahia Filho et al. (1983) e Curi & Franzmeier (1984) afirmaram ser a goethita como a maior responsável pela sorção de P em Latossolos. Embora ocorram

diferentes formas de sorção do P e níveis variáveis de energia na ligação do P aos componentes do solo, pela origem e composição destes, essas ligações são em maioria indesejáveis do ponto de vista da disponibilidade do fósforo. Portanto em busca de verificar a capacidade de cada solo se ligar ao P, utilizam-se soluções com concentrações crescentes de P que permitem quantificar o teor do mesmo no sobrenadante após determinado período de agitação, permitindo o ajuste dos dados à isoterma de Langmuir (Olsen & Watanabe, 1957), a qual possibilita observar a CMAP e a energia de ligação (EA) que é a energia com que a ligação do P ocorre com o solo.

A CMAP representa a capacidade que o solo tem para se ligar ao P, seja por adsorção, fixação ou precipitação e comumente é mencionado nas pesquisas a sua correlação com alguns atributos do solo, portanto as características intrínsecas de cada solo podem promover a inexistência desta correlação quando do estudo de solos com características diferentes (Valladares et al., 2003). Portanto é observado correlações entre a CMAP e diversos atributos do solo (Guilherme et al., 2000; Valladares et al., 2003; Corrêa et al., 2011). Contudo a maneira como a CMAP é determinada é objeto de futuras discussões, pois os métodos utilizados apresentam variação no tempo de agitação e no período de contato da solução de P com o solo, Vasconcellos et al. (1974) utilizaram 18 horas, Ker (1995) considerou 1 dia, Novais & Kamprath (1979) consideraram 6 dias, entre outros períodos utilizados dentro deste intervalo.

Apesar dessa variação do tempo de contato é possível obter a EA do P ao solo quando se efetua o ajuste, dos valores de P encontrados no sobrenadante pelas diferentes concentrações de P adicionadas ao solo, ao modelo de Langmuir, sendo esta representada pelo fator que multiplica a concentração de P na solução de equilíbrio no denominador da equação hiperbólica de Langmuir. Ocorre redução desta energia com a correção da acidez dos solos (Haynes, 1984; Gonçalves et al., 1989; Broggi et al., 2011). Broggi et al. (2011) encontraram valores de EA semelhantes para Latossolos com diferentes teores de argila e conseqüentemente diferentes CMAP. Isso demonstra a manutenção da EA para constituintes semelhantes (qualidade da argila) e apenas variação na quantidade sorvida em função do teor de argila. Ainda neste trabalho fica claro a menor EA nos solos com

argila 2:1, apresentando-se inferior à energia obtida para os Latossolos Amarelos.

São observadas maiores sorções em solos com argilominerais do tipo 1:1, com maiores teores de argila, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Normalmente as maiores CMAP relacionam aos maiores FCP, sendo influenciados pela EA, a qual pode interferir na velocidade com que o P é liberado do solo, visto que se relaciona à força com que a sorção ocorre.

2.4. REFERÊNCIAS

ASSIS, P.C.R. **Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em um Plintossolo Háplico de Cerrado submetido a uma cronosequências de uso agrícola**. Jataí, GO, Universidade Federal de Goiás, 2011. 72p. (Dissertação de Mestrado).

BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RESENDE, M. & RIBEIRO, A.C. Relação entre adsorção de fósforo e componentes mineralógicos da fração argila de Latossolos do Planalto Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7:221-226, 1983.

BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, 38:183-230, 1985.

BROGGI, F.; OLIVEIRA, A.C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M.B.G.S.; NASCIMENTO, C.W.A. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, 35:77-83, 2011.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; ROCHA, A.T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, 33:153-159, 2011.

CURI, N. & FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Journal of the American Society of Agronomy**, 48:341-346, 1984.

EMBRAPA, **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: <http://www.qmdmt.cnpm.embrapa.br/715.htm> . Acesso em 25 de mai. 2012.

FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. **Fertil. Res.**, 45:91-100, 1996.

FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. **Proceedings of the American Society of Agronomy**, 34:902-907, 1970.

GILBERT, N. The disappearing nutrient. **Nature News**, 461:716-718, 2009.

GONÇALVES, J.L.M.; FIRME, D.J.; NOVAIS, R.F.; RIBEIRO, A.C. Cinética de adsorção de fósforo em solos de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 9:107-111, 1985.

GONÇALVES, J.L.M.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; RIBEIRO, A.C. Cinética de transformação de P-lábil em não-lábil, em solos de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 13:13-24, 1989.

GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; BRENÓ, N.B. & MACHADO, R.A.F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:27-34, 2000.

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

HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E.J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 22:223-230, 1998.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. 2004. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>

Acesso em: 01 de jun. 2012.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, 5(1):17-40, 1997.

KER, J.C. **Mineralogia, sorção e desorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 181p. (Tese de Doutorado).

LOPES, A. S. & COX, F.R. Relação de características físicas, químicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 3:82-8, 1979.

MACEDO, J. Os solos da região dos Cerrados. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F., eds. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. UFV/SBCS. 1996. p. 135-155.

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

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre, Evangraf, 2010. 4ª ed. 266p.

NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 3:37-41, 1979.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, 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.

OLSEN, S.R. & KHASAWNEH, F.E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J., eds. **The role of phosphorus in agriculture.** Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.361-410.

OLSEN, S.R. & WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Proceedings of the American Society of Agronomy**, 21:144-149, 1957.

PAVAN, M.A. & MIYAZAWA, M. **Química de solos inundados.** Londrina, IAPAR, 1983. Separata de Treinamento em arroz irrigado e alternativas agrícolas em várzeas. Londrina, IAPAR, 1983. p.5-20.

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e adubação.** Piracicaba, Ceres, 1991. 343p.

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

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H. & SINCLAIR, A.G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, 57:77-159, 1996.

RANNO, S.K.; SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C.; RHODEN, A.C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31:21-28, 2007.

ROLIM NETO, F.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, L.M.; CORRÊA, M.M.; FERNANDES FILHO, E.I.; IBRAIMO, M.M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 28:953-964, 2004.

SAMPLE, E.C. **Factors affecting phosphate retention parameters derived using the Langmuir adsorption equation**. Raleigh, North Carolina State University, 1972. 110p. (Tese de Doutorado).

SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J. & RACZ, G.J. Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J., eds. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.263-310.

SEPLAN-GO, **Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento - Goiás**. 2011. Disponível em: http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/godados/2011/00-aspecto_fisico/00-3-solos.htm . Acesso em: 01 de jun. 2012.

Sharpley, A. N. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. **Journal of Environmental Quality**, 24:920-926, 1995.

SOUZA, R.F.; FAQUIN, V.; TORRES, P.R.F. & BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:975-983, 2006.

TIDMORE, J.W. The phosphorus content of the soil solution and its relation to plant growth. **Journal of the American Society of Agronomy**, 22:481-488, 1930.

VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Adsorção de Fósforo em Solos de Argila de Atividade Baixa. **Bragantia**, Campinas, 62:111-118, 2003.

VASCONCELLOS, C.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F. & PINTO, O.C.B. Fósforo em dois Latossolos do Estado de Mato Grosso: Sorção de fosfato. **Experientiae**, 18:267-285, 1974.

3 – ARTIGO: SORÇÃO E DESSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS SOB VEGETAÇÃO DE CERRADO⁽¹⁾

Flávio Araújo Pinto⁽²⁾, Edicarlos Damacena de Souza⁽³⁾, Helder Barbosa Paulino⁽³⁾ & Marco Aurélio Carbone Carneiro⁽³⁾

RESUMO

A sorção do fósforo (P) pelo solo é um fenômeno que varia em função das características do solo, sua intensidade e magnitude, tornando-o fonte ou dreno de P. O objetivo do presente estudo foi quantificar a sorção e dessorção de P e avaliar as interações entre estes e os atributos físicos e químicos dos solos. O estudo foi realizado em sete solos originalmente sob vegetação de Cerrado e em áreas não antropizadas. Os valores de sorção obtidos foram ajustados à isoterma de Langmuir, sendo avaliados a Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP), a Energia de Adsorção (EA) e o Fator Capacidade de Fósforo (FCP) o qual foi calculado em função dos teores de P-sorvido e P-dessorvido. Os valores da CMAP foram classificados como altos na maioria dos solos, variando de 283 até 2635,7 mg kg⁻¹ e se correlacionaram com os teores de matéria orgânica, argila, silte, areia, saturação por bases e pH. O FCP foi maior nos solos onde se obteve maior CMAP. A utilização de somente um atributo de solo, o teor de argila, como critério de classificação para

Recebido para publicação em 08/05/2012

(1) Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Goiás – UFG.

(2) Mestrando em Produção Vegetal no Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFG. CEP 75805-030 Jataí (GO). E-mail: flavioaraujo10@gmail.com

(3) Docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFG. E-mail: edicarlos@pq.cnpq.br, helderlino51@yahoo.com.br, carbonecarneiro@yahoo.com.br

recomendação da adubação fosfatada apresenta-se suscetível a erros, devendo utilizar-se mais fatores, tornando a recomendação do P mais precisa.

Termos de indexação: Capacidade de adsorção de Fósforo; Langmuir; solos nativos.

SUMMARY: PHOSPHORUS SORPTION AND DESORPTION IN BRAZILIAN CERRADO SOILS

Phosphorus (P) sorption onto soils is a phenomenon that varies depending on soil characteristics, their intensity and magnitude, which make it a source or drain of P. The objective of this study was to quantify the P sorption and desorption and evaluate the interactions between the physical and chemical properties of soils. The study was conducted in seven soils Brazilian Cerrado under native vegetation. Values of adsorption were fitted to the Langmuir isotherm, evaluated the Maximum P Adsorption Capacity (MPAC), the adsorption energy and P Capacity Factor (PCF) which was calculated according to the levels of P-adsorbed and P-desorbed. Values of MPAC were high in most soils, ranging from 283 up to 2635,7 mg kg⁻¹ and were correlated with soil organic matter, clay, silt, sand, base saturation and pH. The PCF was higher in soils where the MPAC was also higher. The use of only one attribute of soil, clay content, as a classification criterion for the recommendation of phosphate fertilizer is susceptible to errors, should be used more factors, making the recommendation of P more precisely.

Index terms: Phosphorus adsorption capacity; Langmuir; native soils.

INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é encontrado em duas fases no solo: uma ligada à fase sólida, com diferentes intensidades de energia de ligação e outra na solução do solo, onde os teores de P são relativamente baixos, entre 0,002 e 2,0 mg L⁻¹ (Fardeau, 1996). O suprimento de P para a fase líquida se dá pelo P-lábil e a velocidade em que ocorre é função do Fator Capacidade de Fósforo do solo (FCP), sendo influenciado pelas

características do solo, principalmente pelo teor de argila e constituição mineralógica, a qual determina a energia das ligações entre o P e a fase sólida do solo (Fox & Kamprath, 1970).

A variação da sorção de P ao solo ocorre em função das características destes. Souza et al. (2006) verificaram correlação entre esse fenômeno e a textura e a mineralogia dos solos, encontrando maiores valores nos solos com maiores teores de argila e mais intemperizados. Nesse sentido Guilherme et al. (2000) encontraram correlações entre a sorção de P com os teores de ferro ditionito (Fe_d), relação $[Fe_{oxalato} (Fe_o) / (Fe_d)]$, matéria orgânica, saturação por bases e acidez potencial, semelhantemente ao encontrado por Ranno et al. (2007). Já Novais & Smyth (1999) consideraram o tipo e teor de argila, de colóides amorfos e de matéria orgânica como os fatores que afetam mais intensamente a sorção de P. Observa-se, portanto, que os diferentes processos de formação e material de origem, além de suas características intrínsecas, proporcionam diferentes características químicas e físicas aos solos. Isso possibilita variações na Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) e diferentes energias na ligação das moléculas de P aos colóides, regulando a quantidade de P-lábil dos solos (Corrêa et al., 2011).

As características intrínsecas permitem caracterizar um solo como fonte ou dreno de P, solos mais intemperizados apresentam maior ponto de carga zero (PCZ), resultando em solos mais eletropositivos, com maior capacidade de adsorver ânions (dreno), como o fosfato. A mineralogia dos solos também pode ser utilizada para caracterizar um solo como dreno ou fonte de P, em que, solos poucos intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) apresentam-se como fontes, enquanto os solos muito intemperizados (oxídicos) e com altos teores de argila, apresentam-se como drenos (Novais & Smyth, 1999).

Nesse sentido os Latossolos são exemplo dessa característica (dreno), principalmente pelo elevado grau de intemperismo e baixos teores de P disponível, podendo adsorver mais de 2 mg g^{-1} de P. Isso equivale a mais de 9200 kg ha^{-1} de P_2O_5 incorporado na camada de 0-20 cm (Ker, 1996). Neste contexto Novais & Smyth (1999) verificaram que metade desta capacidade pode ser fixada com até um mês de contato do ânion fosfato com o solo.

Beckwith (1965) e Fox & Kamprath (1970) observaram que $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de P na

concentração de equilíbrio de P-solução é necessário para se obter o máximo crescimento dos vegetais. Portanto solos mais intemperizados como os Latossolos, os teores de P-solução são menores que nos Neossolos (Souza et al., 2006), reflexo da menor intensidade de fornecimento do P-lábil para o P-solução. O suprimento do P-solução é feito pelo P-lábil do solo, tendendo a manutenção de um equilíbrio, esse movimento relaciona-se ao FCP que é diretamente responsável pelo fluxo de movimentação do P da fração lábil para a solução do solo e variável entre os solos.

Os solos de covais, principalmente os Plintossolos, sofrem anualmente inundação durante o período chuvoso devido a problemas de infiltração ocasionados pelo lençol freático superficial, o que favorece a formação de concreções ferruginosas, que são encontradas nesses solos abaixo de 60 cm de profundidade. No entanto, mesmo com essas variações físicas os mesmos tem sido introduzidos no processo produtivo. Estes solos apresentam no período chuvoso aumento no valor do pH e a ocorrência de redução do Fe e Al, onde estes minerais sofrem alterações na sua valência, ganhando elétrons e reduzindo a adsorção de ânions (Pavan & Miyazawa, 1983). No entanto, com a drenagem destas áreas os óxidos apresentam maior reatividade, que pode ser verificada pela cristalinidade dos óxidos de Fe, comparando os teores de Fe_o/Fe_d onde maiores valores significam menor grau de cristalinidade, relacionando com a maior CMAP (Hernández & Meurer, 1998).

Com isso, o presente trabalho tem a hipótese de que maiores CMAP relacionam-se à ocorrência de altos teores de óxidos nos solos, assim como os teores de argila e matéria orgânica apresentam correlação positiva com a sorção de fosfatos. Portanto o presente trabalho teve como objetivos determinar a CMAP e a dessorção de P de solos do Cerrado brasileiro, e verificar a correlação entre a CMAP e o FCP com atributos químicos e físicos desses solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Visando obter variabilidade com relação aos atributos químicos e físicos do solo, foram utilizadas amostras coletadas na camada superficial (0-20 cm) de sete solos (áreas sem interferência antrópica) do Cerrado brasileiro. Os solos coletados

foram: Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), (17°31'37" S e 51°53'40" W); Latossolo Vermelho distrófico (LVd₁), (17°52'17" S e 51°59'22" W); Neossolo Quartzarênico típico (NQ), (17°46'32" S e 51°49'4" W); Latossolo Vermelho acriférico (LVwf), (17°53'44" S e 51°40'49" W); Latossolo Vermelho distrófico (LVd₂), (12°36'42" S e 52°12'46" W); Plintossolo Háplico (PH₁), coletado no topo dos murundus, (17°58'18" S e 52°4'47" W); Plintossolo Háplico (PH₂), coletado na base dos murundus, (17°58'18" S e 52°4'47" W) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd₃), (17°47'6" S e 51°1'47" W).

As áreas avaliadas apresentaram diversidade nas vegetações e solos, sendo nas áreas de coval a base dos murundus com uma flora hidrófila, essencialmente graminácea e tolerante ao alagamento. No topo ocorre a diversificação da vegetação, além do maior porte das plantas, apresentando espécies lenhosas. Nos demais solos a vegetação predominante é a de Cerrado, sendo o Cerradão para as áreas sob Latossolos Vermelho, o Cerrado Denso na área sob Latossolo Vermelho-Amarelo e o Cerrado Típico na área sob Neossolo.

Posteriormente à coleta, as amostras foram secas em estufa a 40°C e tamisadas em malha de 2 mm de abertura. Posteriormente foram quantificados os teores de carbono orgânico total (método volumétrico), cálcio (KCl), magnésio (KCl), pH (H₂O), alumínio (KCl), acidez potencial (Acetato de cálcio), fósforo (Mehlich 1), potássio (Mehlich 1) (Quadro 1) e areia, silte e argila (método da pipeta) (Quadro 2) (EMBRAPA, 2009). Os teores de ferro (Quadro 2) foram analisados em relação aos teores de ferro total (Fe_t) (Fey & Dixon, 1983; Dick, 1986), teores de ferro oxalato (Fe_o) (Schwertmann, 1964; McKeague, 1966) e teores do ferro ditionito (Fe_d) (Mehra & Jackson, 1960; Holmgren, 1967).

Quadro 1. Atributos químicos de solos de Cerrado

Solo	MO g kg ⁻¹	Al -----	Ca mmol _c dm ⁻³	Mg -----	H+Al -----	pH (H ₂ O)	K - mg dm ⁻³ -	P -----	t mmol _c	T -----	V -----	m -----
LVA	60,6	2,0	9,7	8,0	66,7	5,6	116	0,6	22,7	87,4	24	9
LVd ₁	38,5	9,2	0,5	0,7	72,9	4,3	38	0,7	11,4	75,1	3	81
NQ	15,6	12,3	1,2	0,8	48,7	4,3	19	3,7	14,8	51,2	5	83
LVwf	35,1	8,7	0,7	0,9	67,5	4,9	30	0,6	11,1	69,9	3	78
LVd ₂	39,4	15,2	1,0	1,2	75,4	4,6	30	1,9	18,2	78,4	4	84
PH ₁	47,5	11,0	0,0	0,4	68,6	5,0	30	0,8	12,2	69,8	2	90
PH ₂	60,4	4,4	0,8	0,4	58,7	5,1	30	0,8	6,4	60,7	3	68
LVd ₃	15,8	9,1	0,6	0,5	46,9	4,7	19	1,1	10,7	48,5	3	85

LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo; LVd₁ - Latossolo Vermelho distrófico; NQ - Neossolo Quartzarênico típico; LVwf - Latossolo Vermelho acriférrico; LVd₂ - Latossolo Vermelho distrófico; PH₁ - Plintossolo Háplico (coletado no topo); PH₂ - Plintossolo Háplico (coletado na base); LVd₃ - Latossolo Vermelho distrófico.

Quadro 2. Ferro total (Fe_t), Ferro oxalato (Fe_o), Ferro ditonito (Fe_d) e granulometria de solos do Cerrado

Solo	Fe_t -----	Fe_o g kg ⁻¹	Fe_d -----	Fe_o/Fe_d	Argila -----	Silte g kg ⁻¹	Areia -----
LVA	86,7	1,1	68,1	0,016	559	311	130
LVd ₁	46,7	0,9	45,8	0,020	505	91	404
NQ	5,6	0,2	5,2	0,044	88	40	872
LVwf	138,7	2,0	105,5	0,019	671	172	157
LVd ₂	22,4	1,0	20,5	0,048	418	110	472
PH ₁	6,7	0,7	3,7	0,190	737	123	140
PH ₂	5,4	0,2	2,5	0,100	580	181	239
LVd ₃	18,3	0,3	16,3	0,017	168	81	751

LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo; LVd₁ - Latossolo Vermelho distrófico; NQ - Neossolo Quartzarênico típico; LVwf - Latossolo Vermelho acriférrico; LVd₂ - Latossolo Vermelho distrófico; PH₁ - Plintossolo Háplico (coletado no topo); PH₂ - Plintossolo Háplico (coletado na base); LVd₃ - Latossolo Vermelho distrófico.

Para a análise da CMAP utilizou-se o seguinte procedimento: as amostras foram analisadas em triplicatas, utilizando 1 g de solo em tubo de centrifuga de 50 ml. A cada tubo adicionou-se 30 ml de solução de CaCl_2 ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$), com diferentes concentrações de P. As soluções utilizadas para o processo de sorção apresentavam concentrações de 0, 10, 20, 40, 80 e 160 mg L^{-1} de P, sendo utilizado o reagente KH_2PO_4 para o preparo destas soluções, e o CaCl_2 ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$) como base para as diluições. As soluções permaneceram 72 h em contato com o solo, com um ciclo alternado de agitação e repouso, onde as amostras foram agitadas 12 h em agitador pendular com 60 ciclos por minuto e permaneceram 12 h em repouso, sendo esse processo repetido duas vezes. Posteriormente à agitação, os tubos foram centrifugados por 15 min em 1559 g , promovendo a sedimentação do solo e permitindo a retirada de toda a solução sobrenadante, a qual foi analisada quanto ao teor de P. Os teores de P foram quantificados por espectrofotometria (Braga & Defelipo, 1972).

Para se avaliar a dessorção de P, após a centrifugação e retirada do sobrenadante, foram adicionados 30 ml da solução de CaCl_2 ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$) no tubo e agitados por 72 h utilizando o mesmo procedimento utilizado para verificar a sorção. Após a agitação os tubos foram novamente centrifugados e o líquido sobrenadante quantificado em espectrofotômetro para a determinação do P-dessorvido (Braga & Defelipo, 1972).

Posteriormente os valores de P sorvido encontrados foram ajustados à equação de Langmuir para estimar a CMAP, de acordo com a equação:

$$x/m = kbC/(1 + kC)$$

em que: x/m = Fósforo sorvido ao solo [$\text{mg P (x)}/\text{g solo (m)}$]; k = 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}).

Para a obtenção das estimativas das constantes k e b , utilizou-se a forma linearizada da equação de Langmuir:

$$C/(x/m) = 1/kb + C/b$$

Após os ajustes da equação de Langmuir, foi estimado o Fator Capacidade de Fósforo (FCP) utilizando os valores dos coeficientes b_1 das equações de 2º grau

entre o P-dessorvido e o P-sorvido nas diferentes concentrações de fósforo adicionado para cada solo (Fox & Kamprath, 1970). Análises de regressão e correlações de Pearson foram estabelecidas entre CMAP e FCP com alguns atributos químicos e físicos dos diferentes solos, utilizando o SigmaPlot 10.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aumento da sorção de P pelos solos é intensificado com a maior concentração de P na solução (Figura 1), principalmente no LVA, PH₁, PH₂ e LVwf. Verifica-se que há relação entre a quantidade de P sorvido (Figura 1) e os teores de argila (Quadro 2), em que os maiores teores de P sorvido foram encontrados no LVA, PH₁, PH₂ e LVwf com valores superiores a 1000 mg kg⁻¹. Entretanto, essa relação não é direta, tendo em vista que se houvesse uma proporcionalidade entre argila e sorção, as maiores sorções seriam para o PH₁ e LVwf, demonstrando que outros fatores interferem na sorção de P destes solos de Cerrado.

Observa-se uma fase inicial com intensa sorção de P pelo solo devido à forte atração eletrostática, com posterior adsorção por oxihidróxidos, por meio de troca de ligantes (Barrow, 1985). No entanto, mesmo os solos com elevados teores de óxidos apresentaram uma estabilização na sorção com o aumento da concentração de P adicionada, o que demonstra que os solos podem ter seu caráter dreno de P reduzido com a adição continuada deste elemento. Esse efeito, observado em áreas sem ação antrópica, tem forte influência no manejo da adubação de solos que estão há vários anos sob sistemas de manejo com elevada adubação fosfatada. Áreas cultivadas com agricultura intensiva apresentam adição de altas doses de P, promovendo aumento do teor de P no solo, visto que a adição é maior que a extração pelos vegetais, permitindo o aumento de P no solo e a redução da característica de dreno com o tempo do manejo.

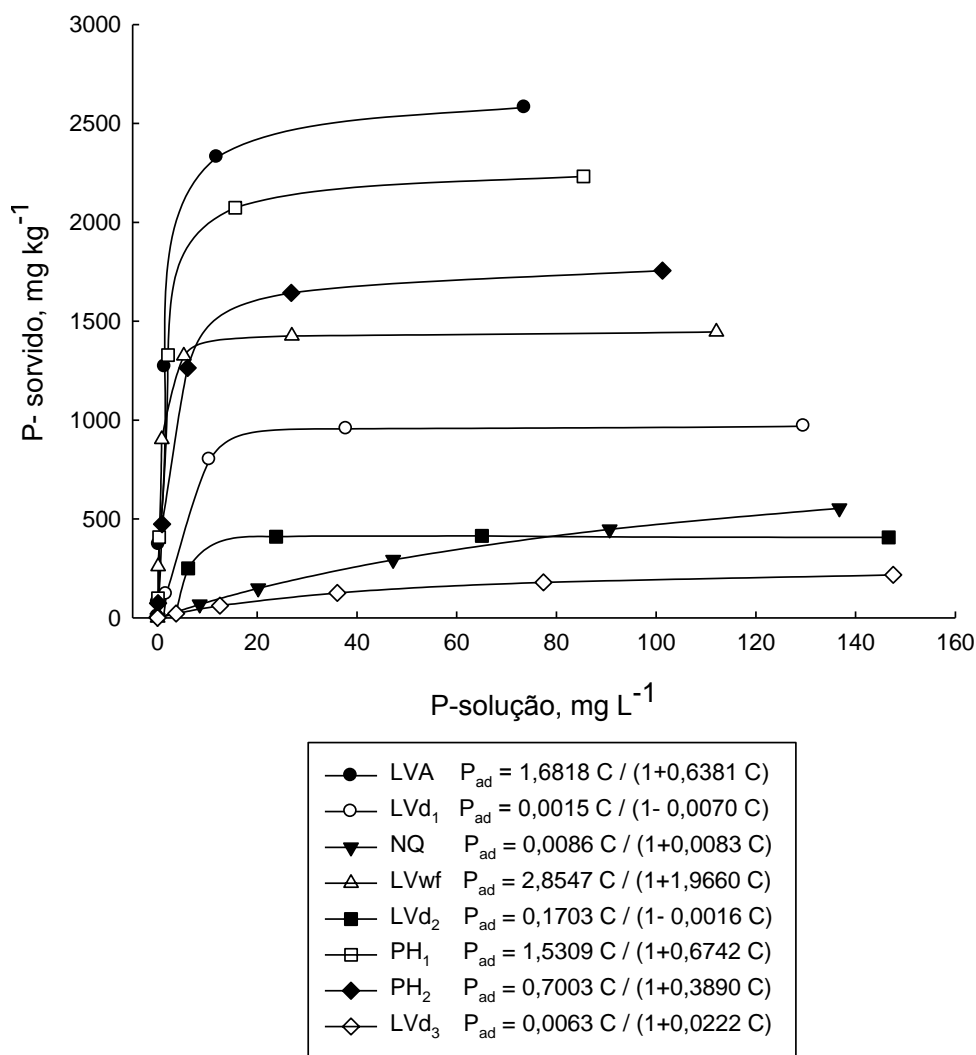


Figura 1. Isotermas de adsorção de Langmuir ajustada por meio de regressão linear em diferentes solos de Cerrado. Coeficiente de determinação (R^2) do modelo linear variando entre 0,41 NQ, 0,52 LVd₃ e 0,99 os demais. LVA – Latossolo Vermelho Amarelo; LVd₁ – Latossolo Vermelho distrófico; NQ – Neossolo Quartzarênico; LVwf – Latossolo Vermelho acríferico; LVd₂ – Latossolo Vermelho distrófico; PH₁ – Plintossolo Háplico (topo do murundum); PH₂ – Plintossolo Háplico (base do murundum); LVd₃ – Latossolo Vermelho distrófico.

Os solos avaliados apresentaram grande amplitude com relação à CMAP e FCP (Quadro 3), devido às diferenças nos atributos químicos e físicos do solo (Quadro 1 e 2). A CMAP variou de 283,0 a 2635,7 mg kg⁻¹, para o LVd₃ e o LVA, respectivamente. Juo & Fox (1977) propuseram uma classificação dos solos

tropicais com relação à sua CMAP, considerando os solos com sorção muito alta os que adsorvem mais que 1000 mg kg^{-1} de P e com sorção alta os que adsorvem entre 500 e 1000 mg kg^{-1} de P. Verifica-se no presente estudo que praticamente todos os solos, com exceção ao LVd₁, LVd₂ e LVd₃, são considerados como solos de alta sorção de P.

Quadro 3. Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), Fator Capacidade de Fósforo (FCP) e Energia de Adsorção (EA) em solos de Cerrado

Solo	CMAP ⁽¹⁾ mg kg ⁻¹	FCP ⁽²⁾	EA ⁽³⁾ L mg ⁻¹	r ⁽⁴⁾ %
LVA	2.635,7	19,0	0,6381	96,3
LVd ₁	918,2	9,0	-0,0070	96,0
NQ	1.044,6	2,3	0,0083	93,3
LVwf	1.452,0	11,3	1,9660	95,8
LVd ₂	401,4	3,6	-0,0016	88,1
PH ₁	2.270,7	16,7	0,6742	96,2
PH ₂	1.800,5	10,4	0,3890	97,1
LVd ₃	283,0	0,3	0,0222	70,8

LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo; LVd₁ - Latossolo Vermelho distrófico; NQ - Neossolo Quartzarênico típico; LVwf - Latossolo Vermelho acriférrico; LVd₂ - Latossolo Vermelho distrófico; PH₁ - Plintossolo Háplico (coletado no topo); PH₂ - Plintossolo Háplico (coletado na base); LVd₃ - Latossolo Vermelho distrófico. ⁽¹⁾ Valores de CMAP estimado a partir da declividade da reta ajustada (b_1). ⁽²⁾ Coeficiente linear (b_1) da equação de 2º grau entre P-sorvido e P-dessorvido. ⁽³⁾ Constante relacionada com a energia de ligação do P. ⁽⁴⁾ Valor do r encontrado na equação de 2º grau entre P-sorvido e P-dessorvido.

O manejo da adubação fosfatada nestes solos, o qual leva em consideração os teores de argila do solo (Sousa & Lobato, 2004), pode não ser completamente eficiente para se recomendar a adubação fosfatada, pela característica mineralógica das argilas e da CMAP e FCP destes. Esse fato é verificado ao se avaliar os solos LVA e LVd₁ que possuem teores de argila com valores muito próximos e a CMAP 287% superior para o LVA. Esse efeito é explicado, muito provavelmente, devido ao elevado teor de óxidos de Fe, tanto amorfo como cristalino, presente na mineralogia

do LVA, em relação ao LVD_1 (Fox & Searle, 1978) e pela maior capacidade de sorção de P pelos óxidos e hidróxidos quando comparados as argilas (Cessa et al., 2009). Ao se observar os valores encontrados para os solos PH_1 e PH_2 (Quadro 2), verificam-se variações maiores no teor de argila (>15%) e menores variações nos teores de óxidos de Fe, o que, para este solo, correlacionou-se melhor com a CMAP, corroborando a recomendação de adubação fosfatada adotada no Cerrado. Esses dois comportamentos demonstram a complexidade do manejo da adubação fosfatada nestas áreas, levando a questionamentos sobre a eficiência da adubação fosfatada na região do Cerrado. Diante disso, mais estudos devem ser realizados a fim de melhor compreender essa dinâmica e aperfeiçoar os métodos de recomendação de P.

Os valores de CMAP encontrados (Quadro 2) correlacionaram em grande parte com os teores de matéria orgânica (MO), argila, silte, areia, saturação por bases e pH, demonstrando a influência da composição química e granulométrica do solo sobre este atributo. O LVA apresentou a maior CMAP seguido pelo PH_1 , no entanto estes solos apresentam diferentes teores de matéria orgânica e de óxidos de Fe, sendo a relação Fe_o/Fe_d do PH_1 maior que a do LVA. Isso indica menor grau de cristalinidade dos óxidos de Fe, resultando em maior reatividade e maior sorção de P relacionada ao Fe. Esse fato, relacionado ao alto teor de argila, pode explicar o elevado valor da CMAP para o LVA em relação aos demais solos. O LVwf apresentou o maior teor de Fe (Quadro 2), entretanto no estudo do Fe_o e Fe_d observa-se que o mineral apresenta maior grau de cristalinidade ($< Fe_o/Fe_d$), portanto neste solo foi encontrada a maior Energia de Adsorção (EA) (Quadro 3), esta que provavelmente se relaciona às cargas originárias deste solo, divergindo do comportamento dos demais onde a EA apresentou correlação com a CMAP (Quadro 4). Nos solos LVA, LVD_1 e LVD_3 pode-se observar que a relação Fe_o/Fe_d também apresentou-se baixa, reduzindo a capacidade de sorção de ânions ligados aos óxidos, como consequência o P ligado ao Fe nestes solos.

Embora os óxidos de Fe influenciem no processo de sorção, demonstrando correlação entre os teores de Fe e a sorção de P (Udo & Uzu, 1972; Juo & Fox, 1977; Hernandez & Meurer, 1998) o presente trabalho não verificou correlações significativas entre os teores de Fe total (Fe_t), Fe_o e Fe_d e a CMAP ou o FCP

(Quadro 4). No entanto, a grande variabilidade nos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo pode estar influenciando a baixa correlação, conforme comenta Valladares et al. (2003), assim como observado para a EA neste trabalho.

Quadro 4. Coeficientes de correlação linear simples (r) e equação de regressão simples entre capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), fator capacidade de fósforo (FCP) e alguns atributos químicos e físicos de solos de Cerrado

Atributos	CMAP			FCP		
	r	Equação	R ²	r	Equação	R ²
MO	0,7 *	y=-77,470+36,521x	0,55	0,8 *	y=-3,207+0,314x	0,65
Fe total	0,2 ^{ns}	-----	0,06	0,4 ^{ns}	-----	0,16
Fe _o	0,2 ^{ns}	-----	0,03	0,4 ^{ns}	-----	0,16
Fe _d	0,2 ^{ns}	-----	0,19	0,4 ^{ns}	-----	0,14
Fe _o /Fe _d	0,4 ^{ns}	-----	0,19	0,4 ^{ns}	-----	0,14
Argila	0,7 *	y=221,441+2,424x	0,44	0,8 *	y=-2,202+0,024x	0,69
Silte	0,7 *	y=307,161+7,529x	0,55	0,8 *	y=0,405+0,063x	0,61
Areia	-0,7 *	y=2223,75-2,207x	0,56	-0,9 *	y=17,371-0,021x	0,80
CTC _{efet} (t)	0,2 ^{ns}	-----	0,05	0,2 ^{ns}	-----	0,06
CTC _{7,0} (T)	0,5 ^{ns}	-----	0,21	0,7 *	y=-14,111+3,429x	0,47
V	0,6 *	y=964,59+65,45x	0,31	0,5 ^{ns}	-----	0,28
pH	0,8 *	y=-6135,13+1551,1x	0,65	0,8 *	y=-48,456+11,93x	0,61
EA	0,4 ^{ns}	-----	0,19	0,5 ^{ns}	-----	0,26
EA ⁽¹⁾	0,9 *	y=-0,1798+0,0003x	0,88	0,9 *	y=-0,0974+0,0395x	0,83

⁽¹⁾ Correlação sem o solo LVwf, * e ^{ns}, significativo e não significativo a 5%, respectivamente.

Nota-se correlação positiva entre a CMAP e a MO (Quadro 4), podendo a MO ser fonte de elétrons para as reações de redução do Fe³⁺ (Pavan & Miyazawa, 1983), a qual pode reduzir a reatividade dos óxidos de Fe, promovendo o aumento das formas de Fe²⁺, reduzindo a capacidade de sorção de ânions pelo Fe e aumentando essa capacidade à MO. Essa correlação também refletiu no FCP onde a MO relaciona-se positivamente (Quadro 4) demonstrando claramente a influência da MO nas características químicas dos solos.

Os teores de argila também se correlacionaram positivamente com a CMAP (Quadro 4), corroborando outros trabalhos que indicam alta sorção de P em solos argilosos (Rolim Neto et al., 2004; Souza et al., 2006). Segundo Novais & Smyth (1999) em solos mais argilosos ocorre uma maior quantidade de sítios ácidos de Lewis, favorecendo assim a sorção de fósforo em solos altamente intemperizados.

Os solos LVA e PH₁ apresentaram os maiores valores do FCP, com valores de 19,0 e 16,7, respectivamente, seguido pelo LVwf, PH₂ e LVd₁ (11,3; 10,4; 9,0, respectivamente) (Quadro 3), e os menores valores de FCP foram observados nos solos NQ, LVd₂ e LVd₃ (2,3; 3,6; 0,3, respectivamente) o que se deve às variações nos atributos físicos, químicos e mineralógicos destes solos (Quadro 1 e 2). Esse valor é definido pelo equilíbrio ou ligação entre variação do P lábil e variação do P em solução. Os solos LVA, PH₁, LVwf, PH₂ e LVd₁ (maiores valores de FCP) favorecem a manutenção dos níveis de P na solução, próximos ao nível de equilíbrio, quando estes solos recebem adubação fosfatada ou tenham o P removido pelas culturas. Já os solos NQ, LVd₂ e LVd₃ necessitam de maiores teores de P, em solução, para suprir a demanda das plantas, pois a reposição do P para a solução, via P lábil, é muito menor.

O FCP se correlacionou positivamente com a MO, argila, silte, soma de bases, CTC_{7,0}, pH e EA e negativamente com os teores de areia (Quadro 4). Souza et al. (2006) encontraram resultados semelhantes com relação à MO, o que se deve, provavelmente, ao efeito dos teores de argila, uma vez que há relação direta entre aumento no teor de argila e incremento nos teores de MO. Desta forma, há de se utilizar com cautela informações referentes aos teores de matéria orgânica no FCP.

Já o pH tem importância no processo de sorção do solo (Tirlone et al., 2009), pois com o aumento do pH as partículas do solo se tornam mais eletronegativas, o que favorece diminuição na sorção do P (Barrow, 1985). No presente trabalho, o pH se correlacionou positivamente com a sorção de P, onde o aumento do pH promoveu maior fixação do P, o que corrobora com os dados de Vasconcelos et al. (1974), os quais verificaram pouca alteração da CMAP em solos de Cerrado. Com relação aos atributos físicos do solo, estes se correlacionaram negativamente com o FCP. A fração de areia apresentou comportamento linear negativo tanto para a CMAP e FCP, sendo que houve uma correlação linear positiva entre o FCP e os

teores de argila o que corrobora os dados de Broggi et al. (2011).

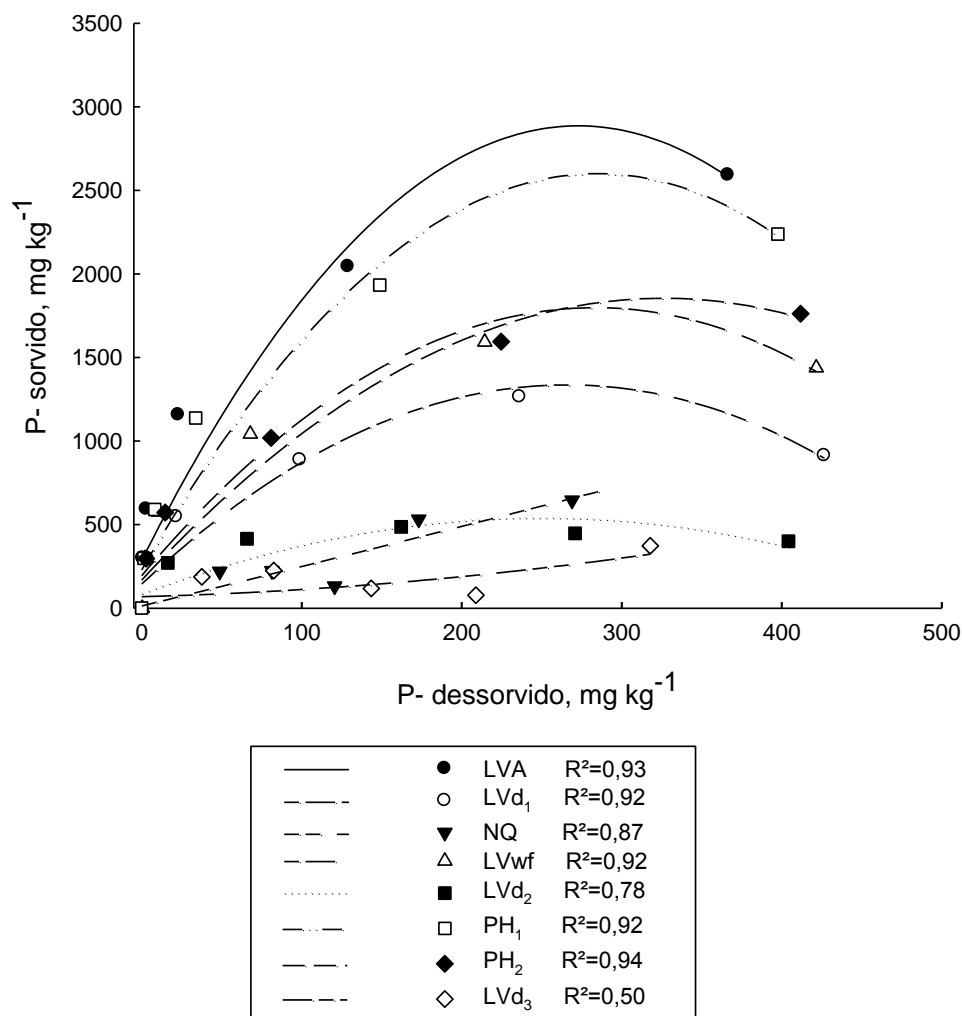


Figura 2. Linhas de tendência das equações de segundo grau entre o P-sorvido e o P-dessorvido sob diferentes concentrações de P adicionado em solos de Cerrado. LVA – Latossolo Vermelho Amarelo, LVd₁ – Latossolo Vermelho distrófico, NQ – Neossolo Quartzarênico, LVwf – Latossolo Vermelho acriférico, LVd₂ – Latossolo Vermelho distrófico, PH₁ – Plintossolo Háplico (topo do murundum), PH₂ – Plintossolo Háplico (base do murundum); LVd₃ – Latossolo Vermelho distrófico.

A comparação dos teores do P-sorvido e P-dessorvido (Figura 2) permite a visualização do FCP (Quadro 3), que representa o fluxo que o P-sorvido do solo apresenta para a solução do solo, mantendo-a em níveis constantes. Maior FCP permite menores variações dos níveis de P na solução do solo, devido à alta

velocidade de reposição do P, já o menor FCP representa menor velocidade desse suprimento. Portanto os solos que apresentam menores CMAP também apresentam menores FCP, permitindo que maior percentual do teor de P-sorvido possa ser liberado na dessorção, disponibilizando praticamente todo o mineral P do solo (Figura 2). Na presença de maiores CMAP ocorrerá o suprimento do P por maior período, pois o P solução é suprido pelo P-sorvido e este só será nulo quando o P-sorvido (fator quantidade) também for nulo (Novais et al. 2007).

A dessorção do P apresenta uma relação direta com o teor de P-sorvido (Figura 2). Nos solos mais arenosos (NQ, LVd₂ e LVd₃) os teores de P-dessorvido foram próximos aos teores sorvidos, visto que estes solos apresentaram baixa sorção de P nas concentrações a que foram submetidas, sendo possível confirmar pelos pequenos valores do FCP (Quadro 3). Esse fato indica que estes solos possuem alta capacidade de liberação do P-lável para a solução do solo, o que para esses solos pode indicar possibilidade de perdas de P do sistema solo. Os demais solos apresentaram menores teores de P-dessorvido (Figura 2), em que o LVA adsorveu mais de 2500 mg kg⁻¹ e liberou para a solução do solo menos de 400 mg kg⁻¹, demonstrando a alta afinidade do P pelos constituintes minerais desse solo. Guilherme et al. (2000) encontraram uma tendência geral, onde solos com maiores valores de CMAP e FCP apresentaram menores teores de P-dessorvido.

CONCLUSÕES

1. A maioria dos solos do Cerrado estudados neste trabalho apresentaram alta sorção de P, correlacionando aos atributos químicos e físicos do solo, como argila, silte, V, pH, MO e areia;
2. O FCP apresentou-se maior nos solos com maior CMAP, correlacionando-se positivamente com o teor de MO, de argila, de silte, soma de bases e pH e, negativamente, com os teores de areia;
3. A utilização de somente um atributo de solo, o teor de argila, como critério de classificação para recomendação da adubação fosfatada apresenta-se suscetível a erros, devendo utilizar-se mais fatores, como a V, o pH e até recomendações específicas para cada classe de solo, possibilitando um manejo adequado do fósforo

no solo;

4. A EA demonstra correlação com a CMAP quando avaliados solos semelhantes, não correlacionando quando avaliado solos com diferentes características químicas;

5. A dessorção de P apresenta-se maior em solos com menor CMAP e FCP, ou seja, nos solos menos intemperizados.

LITERATURA CITADA

BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. *Adv. Agron.*, San Diego, 38:183-230, 1985.

BECKWITH, R.S. Sorbed phosphate at standard supernatant concentration as an estimate of the phosphate needs of soils. *Austr. J. Exp. Agric. An. Husb.*, 5:52-58, 1965.

BRAGA, J.M.; DEFELIPO, B.V. Relações entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I - Trabalhos de laboratório. *Ceres*, São Paulo, 19:124-136, 1972.

BROGGI, F.; OLIVEIRA, A.C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M.B.G.S.; NASCIMENTO, C.W.A. Fator capacidade de fósforo em solos de Pernambuco mineralogicamente diferentes e influência do pH na capacidade máxima de adsorção. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, 35:77-83, 2011.

CESSA, R.M.A.; CELI, L.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J.O. & BARBERIS, E. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos Vermelhos. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 33:1153-1162, 2009.

CORRÊA, R.M.; NASCIMENTO, C.W.A.; ROCHA, A.T. Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos. *Acta Sci. Agron. Maringá*, 33:153-159, 2011.

DICK, D. P. Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos. Porto Alegre: UFRGS, 1986. 196f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

- 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.
- FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. *Fertil. Res.*, 45:91-100, 1996.
- FEY, M. V.; DIXON, J. B. Rapid estimation of iron oxides in soils and clays by spectrophotometric analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 47:1261-1263, 1983.
- FOX, R.L. & KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34:902-907, 1970.
- FOX, R.L.; SEARLE, P.G.E. Phosphate adsorption by soils of the tropics. In: DROSDOFF, M. Diversity of soils in the tropics. Madison: American Society of Agronomy, 1978. p.97-119.
- GUILHERME, L.R.G.; CURTI, N.; SILVA, M.L.N.; BRENÓ, N.B. & MACHADO, R.A.F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do estado de Minas Gerais. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 24:27- 34, 2000.
- HERNÁNDEZ, J.; MEURER, E.J. Adsorção de fósforo e sua relação com formas de ferro em dez solos do Uruguai. *R. Bras. Ci. Solo*, Campinas, 22:223-230, 1998.
- HOLMGREN, G.G.S. A rapid citrat-dithionite extractable iron procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:210-211, 1967.
- JUO, A.S.R. & FOX, R.L. Phosphate sorption capacity of some benchmark soils in West Africa. *Soil Sci.*, 124:370-376, 1977.
- 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.
- McKEAGUE, J. A.; DAY, J. H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Canadian J. Soil Sci.*, Ottawa, 46:13-22, 1966.

- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: CLAYS & CLAY MINERAL CONFERENCE, 7., London, 1960. Proceedings. London, 7:317-327. 1960.
- NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, 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.
- PAVAN, M.A. & MIYAZAWA, M. Química de solos inundados. Londrina, IAPAR, 1983. Separata de Treinamento em arroz irrigado e alternativas agrícolas em várzeas. Londrina, IAPAR, 1983. p.5-20.
- RANNO, S.K.; SILVA, L.S.; GATIBONI, L.C.; RHODEN, A.C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea no estado do Rio Grande do Sul. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, 31:21-28, 2007.
- ROLIM NETO, F.C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, L.M.; CORRÊA, M.M.; FERNANDES FILHO, E.I.; IBRAIMO, M.M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba-MG. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, 28:953-964, 2004.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisen oxide des bodens durch extraktion unit saurer ammoniumoxalat-losung. Zeitschrift Fur Pflanzenernaehr Bodenkd, Weinheim, 105:194-202, 1964.
- SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., eds. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. p.129-144.
- SOUZA, R.F.; FAQUIN, V.; TORRES, P.R.F. & BALIZA, D.P. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. R. Bras. Ci. Solo, 30:975-983, 2006.
- TIRLONE, C.; VITORINO, A.C.T.; NOVELINO, J.O.; TIRLONE, D.; COIMBRA, D.S. Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um

bioativador no solo. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, 33:977-984, 2009.

UDO, E. J.; UZU, F. O. Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigerian soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc*, Madison, 36:879-883, 1972.

VALLADARES, G.S.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C. Adsorção de Fósforo em Solos de Argila de Atividade Baixa. *Bragantia*, Campinas, 62:111-118, 2003.

VASCONCELOS, C.A.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F.; PINTO, O.C.B. Fósforo em dois Latossolos do Estado de Mato Grosso: Sorção de fosfato. *Experientiae*, Viçosa, 18:267-285, 1974.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os compartimentos de P no solo apresentam grande complexidade, em que, se observa a alta variedade de fatores que influem na sorção no solo, desde a origem dos solos, o teor de argila e os fatores afetados pelo manejo.

O teor de argila juntamente com os teores de P disponíveis não deveriam ser utilizados como únicos fatores determinantes para recomendação da adubação fosfatada do solo, como utilizado atualmente para as recomendações de adubação fosfatada no Cerrado. Isso porque em solos com teores de argila semelhantes pode se ter a CMAP completamente distinta. Com isso surge a necessidade de considerar outros atributos de solo para se efetuar as recomendações, visto que a matéria orgânica, a saturação por bases e o pH correlacionam com essa capacidade. Ainda, é imprescindível levar em consideração que a matéria orgânica tem a capacidade de reduzir alguns sítios de sorção de P e, conseqüentemente, diminuir a intensidade de ligação do P com o solo, possibilitando uma maior disponibilidade do elemento.

Devido a essas variações observadas nos solos é fundamental que novas pesquisas determinem um maior número de atributos químicos e físicos com alta correlação ao P. Desta forma, estudos focando novas técnicas para adubação fosfatada devem ser considerados, além de nova calibração da adubação, principalmente para os solos do Cerrado.