

Adsorção de fósforo em dez solos do Estado de Pernambuco e suas relações com parâmetros físicos e químicos

Rossini Mattos Corrêa*, Clístenes Williams Araújo do Nascimento e Alexandre Tavares da Rocha

Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, 52171-900, Recife, Pernambuco, Brasil. *Autor para correspondência. E-mail: rossini.correa@rce.inca.gov.br

RESUMO. Um experimento foi conduzido para estudar a adsorção de fósforo (P) em amostras de dez solos do Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. As relações entre atributos físicos e químicos do solo e as isotermas de adsorção de P foram também avaliadas. Os resultados mostraram que a capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), o P-remanescente (P-rem) e a constante k de da equação Freundlich são variáveis confiáveis para se caracterizar a adsorção de P pelos solos. Pela sua praticidade de determinação, o P-rem é a variável mais indicada. Os parâmetros de adsorção de P CMAP, P-rem e constante k de Freundlich apresentaram correlação ($p < 0,01$) com os atributos químicos acidez potencial (H+Al), alumínio trocável (Al), capacidade de troca catiônica (CTC) e com os atributos físicos teor de argila e capacidade de campo (CC). As variáveis CC, P-rem, H+Al, Al, CTC e teor de argila, entre os atributos físicos e químicos avaliados, permitem para os solos estudados a estimativa do valor da CMAP. A energia de adsorção de fosfato e a constante n da isoterma de Freundlich não foram indicadores confiáveis do poder de adsorção de fósforo dos solos.

Palavras-chave: fixação de fósforo, Langmuir, Freundlich.

ABSTRACT. Phosphorus adsorption in ten soils from Pernambuco State and its relations with physical and chemical parameters. An experiment was carried out to study phosphorus (P) adsorption in ten soil samples from Pernambuco State, Northeastern Brazil. The relationship between physical and chemical soil attributes and P adsorption isotherms were also evaluated. The results showed that maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC), remaining P (Rem-P) and the k constant of the Freundlich equation are reliable variables to characterize P adsorption by the soils. Due to its easy determination, Rem-P is the best indicated variable. The parameters of P adsorption MPAC, Rem-P and the k constant of the Freundlich equation showed correlation ($p < 0.01$) with the chemical attributes potential acidity (H+Al), exchangeable aluminum (Al), exchangeable cation capacity (ECC) and with the physical attributes clay and field capacity (FC). The variables FC, Rem-P, H+Al, Al, ECC and clay, among the chemical and physical attributes evaluated, allowed estimating the MPAC value on the studied soils. The P adsorption energy and the n constant of the Freundlich isotherm were not reliable indicators of the P soil adsorption power.

Keywords: phosphorus fixation, Langmuir, Freundlich.

Introdução

O termo fixação de P envolve mecanismos de adsorção, por ligações eletrostáticas ou covalentes, e de precipitação, com formação de compostos insolúveis, tornando o elemento indisponível para as plantas (ALCARDE et al. 1991).

O conhecimento de atributos do solo, que reflete o poder de adsorção de fósforo, permite o aprimoramento do diagnóstico da dinâmica deste elemento no solo e da sua disponibilidade para os vegetais (NOVAIS; SMYTH, 1999). O fósforo da

solução do solo é denominado fator intensidade (I). O suprimento de I à medida que o fósforo é absorvido, é mantido pelo fator quantidade (Q), quantitativamente maior que o I. Há, portanto, um equilíbrio entre o fator I e Q, esta interdependência caracteriza o fator capacidade de P, quantitativamente definido pela relação Q/I. Em solos com maior adsorção de P, como os mais argilosos e, de modo particular, os mais intemperizados, a relação Q/I será maior do que em solos com menor adsorção, como nos arenosos e, se

argilosos, menos intemperizados. Portanto, para o mesmo valor de $Q + I$, um solo argiloso terá menos P em solução (I) e mais P -lábil (Q) que um solo arenoso. Por outro lado, para solos com o mesmo valor de I , a planta terá mais P à sua disposição naquele com maior Q , maior fator capacidade (NOVAIS; SMYTH, 1999).

A representação matemática dos mecanismos de adsorção tem sido realizada por meio de isotermas, que descrevem quantitativamente a adsorção de solutos à superfície de sólidos (BOHN et al. 1985). Existem, segundo Barrow (1978), duas razões para utilizar modelos que descrevem a adsorção no solo. A primeira é que possibilita a expressão numérica dos atributos de solo e, a segunda, que permite conhecer mais a respeito da natureza dos processos de adsorção.

A isoterma de Langmuir baseia-se na adsorção em sítios uniformes com recobrimento em monocamada e afinidade iônica independente da quantidade de material adsorvido. A isoterma de Langmuir foi utilizada pela primeira vez por Olsen e Watanabe (1957) para descrever a adsorção de P pelo solo. A maior vantagem da equação de Langmuir sobre outras isotermas é que a capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP) e a constante relacionada com a energia de adsorção podem ser calculadas e estes valores podem ser relacionados com atributos do solo (NOVAIS; SMYTH, 1999; OLSEN; WATANABE, 1957). Harter e Baker (1977) verificaram que a isoterma de Langmuir é eficiente no estudo do fenômeno de adsorção do solo, principalmente quando no estudo comparativo de vários solos se correlaciona a CMAP com as características químicas, físicas e mineralógicas destes. A isoterma de Freundlich considera a não uniformidade das superfícies reais e, quando aplicado ao solo, descreve bem a adsorção iônica dentro de certos limites de concentração, acima dos quais apresenta limitações em estimar a quantidade de íons no sistema (BARROW, 1978).

Considerando que o manejo eficiente da adubação fosfatada depende além do P disponível determinado por extratores, de informações relativas ao fator capacidade de fósforo no solo (NOVAIS; KAMPRATH, 1979b), o presente trabalho teve como objetivos determinar parâmetros de adsorção de fósforo em amostras de dez solos do Estado de Pernambuco e estudar a relação entre os parâmetros de adsorção de P e atributos físicos e químicos dos solos.

Material e métodos

Amostras de solo foram coletadas do horizonte superficial de dez solos do Estado de Pernambuco.

Os solos foram classificados de acordo com Embrapa (1999) e as coletas ocorreram em três zonas fisiográficas do Estado: Sertão: Argissolo Amarelo eutrófico (PA1), Latossolo Amarelo (LA1) e Neossolo Quartzarênico (RQ); Agreste: Argissolo Amarelo Tb Álico (PA2), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA); Zona da Mata: Argissolo Amarelo (PA3), Latossolo Amarelo (LA2), Espodossolo Álico (EP) e Plintossolo Tb Álico (PL). As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em peneira com abertura de 2 mm e caracterizadas química e fisicamente (Tabela 1) de acordo com Embrapa (1997).

Na caracterização física foram determinados: a composição granulométrica pelo método do densímetro e a capacidade de campo (CC) conforme Embrapa (1997). Na caracterização química do solo, foi medido o pH em água (1:2,5). Os teores de P , de potássio (K) e de sódio (Na) foram determinados com extrator Mehlich-1 (EMBRAPA, 1997). O fósforo disponível foi dosado por colorimetria (BRAGA; DEFELIPO, 1974). Os cátions trocáveis K e Na foram determinados por fotometria de chama. Acidez potencial ($H+Al$) foi extraída com solução de acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ tamponada a pH 7,0 e determinada por titulometria de neutralização (EMBRAPA, 1997). Os elementos trocáveis cálcio (Ca), magnésio (Mg) e Alumínio (Al) foram extraídos com solução de cloreto de potássio 1 mol L^{-1} e determinados por titulometria de neutralização (EMBRAPA, 1997).

Com os resultados das análises, foram calculadas a soma de bases (SB), a percentagem de saturação por bases (V), a saturação por alumínio e capacidade de troca catiônica (CTC). O baixo valor de P disponível foi o critério adotado na seleção dos solos.

O P -rem foi determinado na solução de equilíbrio obtida após agitação de uma amostra de solo de 5 cm^3 com 50 mL de solução de $CaCl_2$ 10 mmol 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).

Na determinação da CMAP foram utilizados $2,5 \text{ cm}^3$ de solo transferidos para tubos de centrífuga de 40 mL de capacidade, aos quais se adicionaram 25 mL de solução de $CaCl_2$ 10 mmol L^{-1} contendo diferentes concentrações de P . Após 24h de agitação, as amostras foram centrifugadas a 3.000 rpm por 5 min. e filtradas. Para cada dose de P foram preparadas três repetições (ALVAREZ, 1987). A dosagem de P na solução de equilíbrio foi realizada

de acordo com Braga e Defelipo (1974). Os dados de P adsorvido e as concentrações de P das soluções de equilíbrio foram ajustados à equação de Langmuir e de Freundlich.

No processo de adsorção de fosfatos existem três fases distintas, denominadas regiões I, II e III (MULJADI et al. 1966a e b). Essas fases estão relacionadas com a afinidade dos fosfatos a sítios de adsorção energeticamente diferentes (MULJADI et al. 1966c). Para a equação de Langmuir, três regiões de adsorção foram identificadas e ajustadas a modelos de regressão linear, a região II foi utilizada para a realização dos cálculos da CMAP e da energia de adsorção de fosfato (EAP) por ser a região que melhor cumpre as pressuposições da equação de Langmuir em estudos de solos (ALVAREZ, 1982 apud ALVAREZ; FONSECA, 1990). Para a equação de Freundlich foram determinadas as constantes k e n.

Foi obtida a correlação linear simples entre os valores de CMAP, EAP constante n e k de Freundlich e destes índices com atributos físicos e químicos do solo. Realizaram-se análises de regressão linear simples entre os valores de CMAP e atributos físicos e químicos e P-rem.

Resultados e discussão

Os elevados coeficientes de correlação obtidos, a partir das equações linearizadas de Langmuir e Freundlich (Tabela 2), indicam que os modelos de adsorção foram significativamente capazes de estimar a adsorção de P nos solos, corroborando outros trabalhos (GODINHO et al. 1997;

PEREIRA; FARIA, 1998). Os valores de CMAP variaram de 904,13 a 37,04 mg kg⁻¹. Em ordem decrescente do valor de CMAP apresentaram-se os solos: LA2 > LVA > PA2 > EP > PVA > PA1 > PL > PA3 > RQ > LA1 (Tabela 2). Observou-se de maneira geral que os maiores valores de CMAP foram observados nos solos mais ácidos, com maiores valores de alumínio trocável, acidez potencial e concentração de argila (Tabelas 1 e 2).

Resultados semelhantes na amplitude de variação dos valores de CMAP foram obtidos por Pereira e Faria (1998) para solos da região semiárida do Nordeste e por Valladares et al. (2003) para solos constituídos por argila de atividade baixa de diferentes regiões do Brasil. Falcão e Silva (2004), avaliando as características de adsorção de P em alguns solos da Amazônia Central, também constataram ampla variação na CMAP, com valores entre 297 e 888 mg kg⁻¹; Ferreira e Magalhães (1974), estudando a adsorção de P em amostras de 12 solos do RS, verificaram ampla variação na CMAP, também superior a dez vezes entre solos que apresentaram valores extremos, resultados semelhantes aos observados neste trabalho.

Os valores de fósforo remanescente obtidos neste trabalho apresentaram grande amplitude, variando de 12,8 a 57,8 mg L⁻¹ e indicando que os solos estudados apresentam potencial para fixação de fósforo muito diferentes (Tabela 2).

Godinho et al. (1997), trabalhando com três solos da região semiárida do Rio Grande do Norte, obtiveram valores de fósforo remanescente que variam de 32,11 a 44,63 mg L⁻¹, cujos valores apresentam menor amplitude do que o observado neste estudo com solos com capacidade intermediária de adsorção de P.

Tabela 1. Atributos físicos e químicos das amostras de solo estudadas.

Atributos	Solos									
	PA3	LA2	EP	PL	PVA	LVA	PA2	PA1	RQ	LA1
pH do solo (H ₂ O)	5,3	4,4	5,1	5,6	5,1	4,6	4,6	6,4	4,8	5,0
Ca ⁺⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,50	0,12	0,20	0,50	1,20	1,00	0,40	2,20	1,20	1,00
Mg ⁺⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,55	0,63	0,90	0,20	0,10	0,70	0,20	0,80	0,30	0,40
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,02	0,02	0,03	0,19	0,22	0,24	0,09	0,42	0,12	0,24
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0	0	0,03	0,09	0,16	0,07	0,01	0,11	0,04	0,03
Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	1,1	0,8	1,2	1,0	1,7	2,0	0,7	3,5	1,7	1,7
Acidez potencial (cmol _c dm ⁻³)	3,72	14,5	4,80	2,30	5,30	4,60	2,90	0,50	1,80	2,50
Al ⁺⁺⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,39	1,98	0,50	0,20	0,20	2,20	1,10	0,10	0,30	0,40
CTC (cmol _c dm ⁻³) ¹	4,8	15,3	6,0	3,3	7,0	6,7	3,7	4,0	3,5	4,2
Saturação por bases (%)	23	5	20	30	24	30	19	88	48	40
Saturação por alumínio (%)	26	71	29	17	11	53	61	3	15	19
Fósforo disponível (mg dm ⁻³)	2,12	4,08	1,00	6,00	3,00	5,00	3,00	3,00	6,00	3,00
Areia (dag kg ⁻¹)	88,0	48,0	89,5	72,3	63,5	52,0	66,0	78,1	91,4	78,2
Silte (dag kg ⁻¹)	3,0	4,0	4,0	16,7	13,2	9,0	6,0	11,5	2,0	6,3
Argila (dag kg ⁻¹)	9,0	48,0	6,5	11,0	23,3	39,0	28,0	10,4	6,6	15,5
Capacidade campo (%)	5,1	25,3	4,3	8,3	10,1	22,8	10,6	5,7	1,9	7,8

¹CTC - capacidade de troca catiônica calculada pelo somatório dos cátions trocáveis: Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺ e H⁺ + Al⁺⁺⁺; PA3 - Argissolo Amarelo; LA2 - Latossolo Amarelo; EP - Espodossolo Álico; PL - Plintossolo Tb Álico; PVA - Argissolo Vermelho-Amarelo; LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo; PA2 - Argissolo Amarelo Tb Álico; PA1 - Argissolo Amarelo eutrófico; RQ - Neossolo Quartzarênico; LA1 - Latossolo Amarelo.

Tabela 2. Equações de Langmuir e Freundlich, seus coeficientes de determinação (R^2), CMAP, EAP, P-rem e os parâmetros k e n da equação de Freundlich para os solos estudados.

Solo	Equação de Langmuir	R^2	CMAP (mg kg ⁻¹)	EAP (mg cm ⁻³) ⁻¹	P-rem (mg L ⁻¹)
PA3	$\hat{Y} = 9,6729X + 13,336$	0,95**	81,42	0,7253	47,0
LA2	$\hat{Y} = 1,0376X + 2,0078$	0,94**	904,13	0,5168	12,8
EP	$\hat{Y} = 4,4613X + 4,8654$	0,99**	177,86	0,9169	42,0
PL	$\hat{Y} = 7,9019X + 46,632$	0,96**	110,09	0,1695	56,2
PVA	$\hat{Y} = 6,1106X + 25,108$	0,96**	151,43	0,2434	43,3
LVA	$\hat{Y} = 1,6592X + 3,8505$	0,99**	663,77	0,4309	19,8
PA2	$\hat{Y} = 3,727X + 12,604$	0,99**	259,73	0,2957	47,4
PA1	$\hat{Y} = 7,4388X + 47,939$	0,94**	102,75	0,1552	54,7
RQ	$\hat{Y} = 15,797X + 97,729$	0,71**	44,58	0,1616	57,8
LA1	$\hat{Y} = 22,561X - 105,24$	0,85**	37,04	-0,2144	53,2
Solos	Equação de Freundlich	R^2	k	n	
PA3	$\hat{Y} = 0,2323X - 1,2522$	0,82**	0,056	0,232	
LA2	$\hat{Y} = 0,3828X - 0,4446$	0,98**	0,359	0,383	
EP	$\hat{Y} = 0,1972X - 0,9246$	0,88**	0,119	0,197	
PL	$\hat{Y} = 0,3081X - 1,3254$	0,88**	0,047	0,308	
PVA	$\hat{Y} = 0,285X - 1,1877$	0,96**	0,065	0,285	
LVA	$\hat{Y} = 0,3122X - 0,613$	0,96**	0,244	0,312	
PA2	$\hat{Y} = 0,3465X - 1,0345$	0,95**	0,092	0,346	
PA1	$\hat{Y} = 0,322X - 1,3513$	0,94**	0,044	0,322	
RQ	$\hat{Y} = 0,3778X - 1,6766$	0,79**	0,021	0,378	
LA1	$\hat{Y} = 0,1873X - 1,42$	0,71**	0,038	0,187	

**significativo a 1 %; PA3 - Argissolo Amarelo; LA2 - Latossolo Amarelo; EP - Espodosolo Álico; PL - Plintossolo Tb Álico; PVA - Argissolo Vermelho-Amarelo; LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo; PA2 - Argissolo Amarelo Tb Álico; PA1 - Argissolo Amarelo eutrófico; RQ - Neossolo Quartzarênico; LA1 - Latossolo Amarelo. CMAP - capacidade máxima de adsorção de P; EAP - energia de adsorção de P; P-rem - fósforo remanescente.

Resultados semelhantes aos verificados no presente trabalho para a variável P-rem foram obtidos por Valladares et al. (2003) que avaliaram possíveis correlações entre atributos físicos e químicos do solo e a CMAP em solos com argila de atividade baixa de diferentes regiões do Brasil, utilizando amostras de horizontes superficiais e subsuperficiais de 16 perfis de solos. Para os horizontes superficiais, os valores de P-rem situaram-se entre 20,0 mg L⁻¹ em amostra de um Latossolo Bruno distrófico e 40,8 mg L⁻¹ em Argissolo Amarelo distrófico.

Neste trabalho foi observado que, de maneira geral, os solos mais argilosos apresentaram os maiores valores de CMAP (Tabelas 1 e 2). Outros autores também obtiveram resultados semelhantes: Ranno et al. (2007) indicaram que a correlação positiva e significativa ($R^2 = 0,81$) entre o teor de argila e a CMAP demonstra a dependência do processo de adsorção de P e da dinâmica deste elemento com a presença de colóides no solo, ou seja, a magnitude da sorção depende da quantidade de constituintes com capacidade de sorver moléculas de fosfato. Tal comportamento foi observado em diversos trabalhos (BOSCHETTI et al. 1998; FALCÃO; SILVA, 2004; VALLADARES et al., 2003). Desse modo, a concentração de argila e os atributos a ela associados podem estimar a CMAP, ressaltando que a definição do tipo de argila é muito importante, pois há grande variação na CMAP das diferentes argilas do solo. Por exemplo, Falcão e Silva (2004) obtiveram correlação significativa entre a CMAP e o teor de argila, similar ao verificado neste trabalho. Ao contrário do presente trabalho,

entretanto, estes autores obtiveram correlação significativa entre a CMAP e saturação por base e entre CMAP e EAP (Tabela 3).

Os atributos do solo capacidade de troca de cátions, acidez potencial, argila, capacidade de campo e alumínio trocável apresentaram correlação ($p < 0,01$) com os parâmetros de adsorção de P: CMAP, P-rem e constante k de Freundlich (Tabela 3). A relação foi direta entre estes atributos físicos e químicos e os parâmetros CMAP e constante k de Freundlich e inversa dos atributos físicos e químicos com o P-rem. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Novais e Kamprath (1979a), Bahia Filho et al. (1983), Boschetti et al. (1998), Pereira e Faria (1998) e Guilherme et al. (2000). O pH do solo não se correlacionou ($p < 0,05$) com os parâmetros de adsorção de P (dados não apresentados) resultado contrário ao obtido por Pereira e Faria (1998) e Boschetti et al. (1998).

A EAP não apresentou correlação significativa com atributos físicos, químicos, CMAP, P-rem e constantes n e k de Freundlich (Tabela 3). Resultado semelhante ao obtido neste trabalho foi observado por Bahia Filho et al. (1983), os quais não obtiveram correlação significativa da EAP com atributos físicos, químicos e parâmetros de adsorção de fósforo. Ranno et al. (2007) observaram que a correlação entre a CMAP e a energia de ligação não foi significativa, este resultado foi semelhante ao obtido no presente estudo (Tabela 3).

Holford e Mattingly (1976) consideram que essa correlação pode ser baixa, dependendo do estado de P no solo. À medida que se vai enriquecendo o solo com P, como consequência das fertilizações, o solo

Tabela 3. Coeficientes de correlação linear simples entre constantes das equações de Langmuir e Freundlich e entre características físicas e químicas dos solos e constantes das equações de Langmuir e Freundlich.

	Al	CTC	V	P	Argila	CC	CMAP	EAP	P-rem	k	n
H+Al	0,65*	0,98**	-0,67*	-0,04	0,75*	0,75*	0,83**	0,39	-0,84**	0,87**	0,27
Al		0,65*	-0,48	0,19	0,89**	0,91**	0,93**	0,27	-0,90**	0,90**	0,37
CTC			-0,52	-0,04	0,76**	0,77**	0,85**	0,34	-0,86**	0,89**	0,30
V				0,11	-0,48	-0,45	-0,47	-0,47	0,55	-0,52	0,05
P					0,18	0,24	0,18	-0,46	0,00	0,07	0,65*
Argila						0,97**	0,92**	0,05	-0,88**	0,87**	0,46
CC							0,95**	0,11	-0,92**	0,92**	0,39
CMAP								0,34	-0,95**	0,99**	0,46
EAP									-0,44	0,39	-0,13
P-rem										-0,97**	-0,25
k											0,35

*, **significativos a 5 e 1 %, respectivamente; H+Al - acidez potencial; Al - alumínio trocável; CTC - capacidade de troca de cátions; V - saturação por bases; P - fósforo disponível; CC - capacidade de campo; CMAP - capacidade máxima de adsorção de fosfato; EAP - energia de adsorção de fosfato; P-rem - fósforo remanescente; k - constante k de Freundlich; n - constante n de Freundlich.

se aproxima gradualmente do seu caráter fonte de P e a energia de ligação diminui gradualmente, tendendo para zero (BAHIA FILHO et al., 1982).

Dessa forma, quando se trabalha com grande diversidade de solos, cada qual com um histórico de fertilizações, torna-se difícil encontrar relação entre a CMAP e a EAP. Contrário aos resultados obtidos neste trabalho, Novais e Kamprath (1979a) obtiveram correlações significativas entre a EAP e atributos físicos, químicos e parâmetros de adsorção de fósforo. Foram observadas correlações altamente significativas entre os parâmetros de adsorção CMAP, P-rem e constante k de Freundlich (Tabela 3). Observando-se os valores de EAP das amostras de solos analisadas (Tabela 3) e realizando-se a comparação desta variável com a CMAP (Tabela 3) e com o teor de argila (Tabela 1) concluiu-se que, de modo geral, há relação direta e para baixos valores de CMAP e argila corresponde baixo valor de EAP. Entretanto para os solos PA3 e EP este fato não se verificou. Para estes solos para valores baixos de CMAP e de teor de argila estava associado um valor relativamente alto de EAP. Infere-se que o tamanho do compartimento para adsorver P nem sempre é diretamente proporcional a EAP, esta variável é provavelmente determinada pelo tipo de argila sendo a EAP uma sua característica típica.

As análises de regressão realizadas entre a CMAP e os atributos físicos, químicos e o P-rem apresentaram como significativas ($p < 0,05$) as regressões entre a CMAP e as variáveis P-rem, capacidade de campo (CC), teor de argila, alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al) e capacidade de troca catiônica (CTC) (Figura 1). A partir destas equações a CMAP pode ser estimada utilizando-se dados de P-rem, CC, teor de argila, Al, H+Al e CTC (Figura 1) e inferências poderão ser feitas a respeito do fator capacidade de P do solo para o conjunto de amostras estudadas. Considerando o número de solos estudados, a utilização destas equações não deve ser extrapolada para qualquer tipo de solo, sendo adequada

somente para solos com atributos físicos e químicos semelhantes aos dos solos estudados.

Observou-se que a regressão entre a CMAP e o teor de argila ($p < 0,01$) confirmou a expressiva relação entre estes atributos (Figura 1a), relação que também foi observada por outros autores que obtiveram correlação significativa entre estas variáveis (BOSCHETTI et al., 1998; FALCÃO; SILVA, 2004; RANNO et al., 2007; VALLADARES et al., 2003).

A fração argila (óxidos de ferro e alumínio e caulinita) é responsável pelo fenômeno de adsorção específica de P e desse modo estabelece uma relação direta com a CMAP.

A CC e CTC obtiveram ajuste de equação significativo ($p < 0,01$) com a CMAP (Figura 1b e c). A relação destas variáveis com a CMAP reside no fato de a CC e a CTC serem relacionadas, em parte, com a maior ou menor concentração de argila do solo, a relação é direta e desse modo quanto maior o teor de argila maior a CC e maior a CTC, e quanto maior o teor de argila, normalmente, maior a CMAP. Desse modo, a concentração de argila e os atributos que estão associados a esta concentração podem indicar o fator capacidade de P do solo o que foi demonstrado pelas regressões significativas ($p < 0,01$) obtidas entre a CMAP e a CC e entre a CMAP e a CTC (Figura 1b e c).

A precipitação de fósforo no solo é a reação deste elemento com formas iônicas de Al^{+3} e Fe^{+3} em solos ácidos ou com o Ca^{+2} em solos neutros ou calcários formando compostos de composição definida e pouco solúvel. Este fenômeno é de difícil distinção do processo de adsorção e ambos são descritos pelo mesmo modelo matemático (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Desse modo, as variáveis Al e H+Al apresentam uma relação direta com a CMAP o que no presente trabalho foi observado pelas regressões significativas ($p < 0,01$) entre a CMAP e estas variáveis (Figura 1d e e).

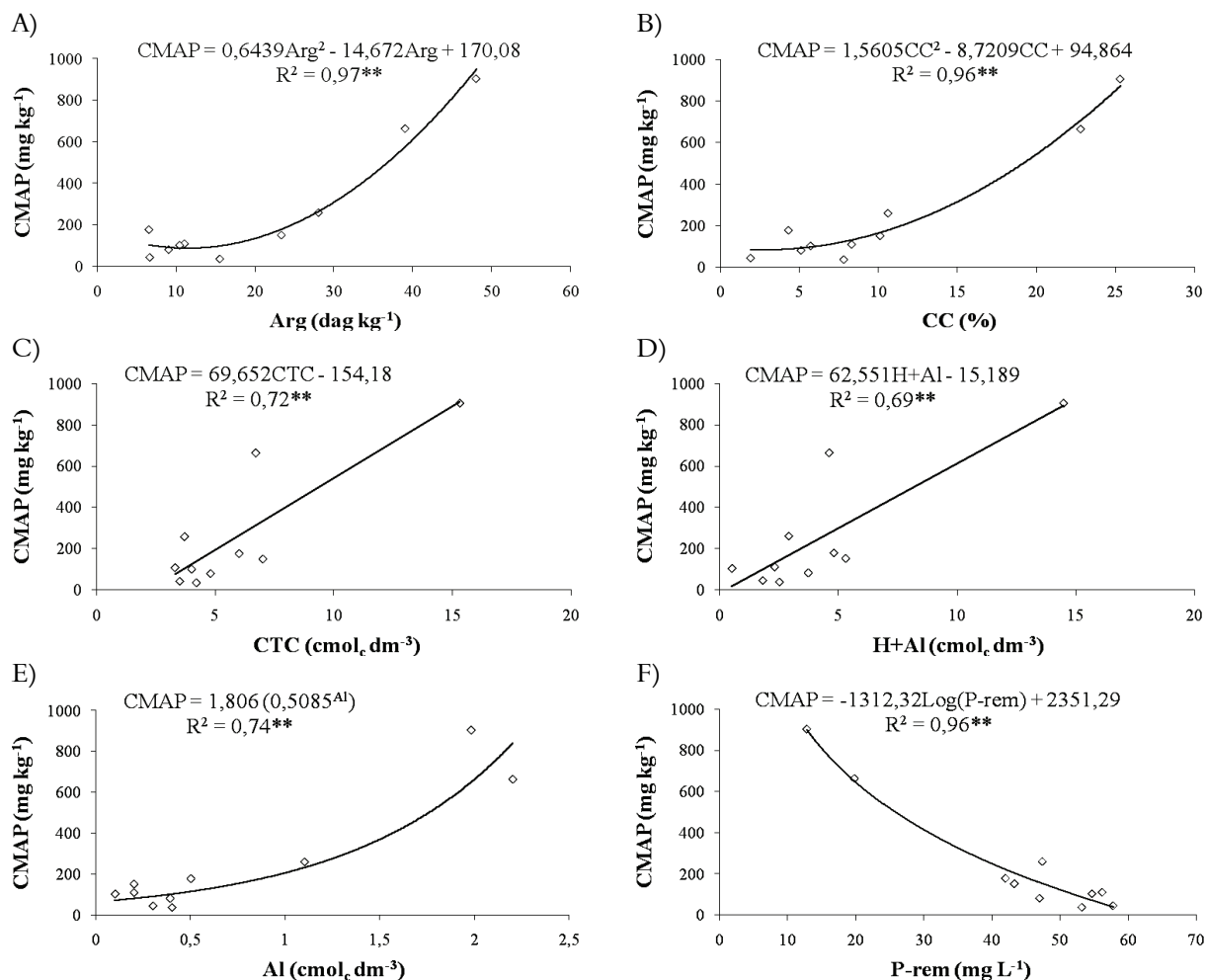


Figura 1. Relações entre a capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP) e as variáveis fósforo remanescente (P-rem), capacidade de campo (CC), teor de argila (Arg), alumínio trocável (Al), acidez potencial (H+Al) e capacidade de troca catiônica (CTC).

A regressão significativa ($p < 0,01$) da CMAP com a H+Al obtida no presente trabalho (Figura 1d) também foi observada por outros autores. Guilherme et al. (2000) obtiveram regressões entre a CMAP e atributos da camada superficial de 11 solos de várzea de Minas Gerais, as equações de regressão entre a CMAP e a acidez potencial, matéria orgânica e ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato foram significativas ($p < 0,01$).

Com os valores de P-rem e de CMAP (Tabela 2) obteve-se regressão com excelente ajuste (Figura 1f). Com o ajuste da equação foi possível estimar com alta precisão os valores da CMAP a partir dos valores de P-rem, variável de fácil determinação em laboratório. Boschetti et al. (1998) também observaram que o P-rem foi sensível indicador do fator capacidade de P do solo e também obtiveram ajuste de equação significativo (0,001%) entre a CMAP e o P-rem, resultado semelhante ao obtido no presente trabalho.

Conclusão

A capacidade máxima de adsorção de fosfato (CMAP), o P-remanescente (P-rem) e a constante k da equação de Freundlich são variáveis confiáveis para se caracterizar a adsorção de P pelos solos. Pela sua praticidade de determinação o P-rem é a variável mais indicada.

Os parâmetros de adsorção de P CMAP, P-rem e constante k de Freundlich apresentaram correlação ($p < 0,01$) com a acidez potencial, alumínio trocável, capacidade de troca catiônica e com o teor de argila e capacidade de campo do solo.

As variáveis CC, P-rem, H+Al, Al, CTC e teor de argila, entre os atributos físicos e químicos avaliados, permitem para os solos estudados, a estimativa do valor da CMAP.

A energia de adsorção de fosfato e a constante n de Freundlich não foram indicadores confiáveis do poder de adsorção de fósforo dos solos.

Referências

- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os Adubos e a eficiência das adubações**. 2. ed. São Paulo: ANDA, 1991.
- ALVAREZ, V. H. **Capacidade máxima de adsorção de fosfatos: 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.
- ALVAREZ, 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. p. 27-32 (Boletim Informativo).
- BAHIA FILHO, A. F. C.; VASCONCELLOS, C. A.; SANTOS, H. L.; MENDES, J. F.; PITTA, G. V. E.; OLIVEIRA, A. C. Formas de fósforo inorgânico e fósforo “disponível” em um Latossolo Vermelho-Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, n. 2, p. 99-104, 1982.
- 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**, v. 7, n. 3, p. 221-226, 1983.
- BARROW, N. J. The description of phosphorous adsorption curves. **Soil Science**, v. 29, n. 2, p. 447-462, 1978.
- BOHN, H.; MCNEAL, B.; O’CONNOR, G. **Soil Chemistry**. Toronto: John Wiley, 1985.
- BOSCHETTI, A. N. G.; QUINTERO, G. C. E.; BENAVIDEZ, Q. R. A. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Ríos, Argentina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 95-99, 1998.
- BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. **Revista Ceres**, v. 21, p. 73-85, 1974.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.
- EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1999.
- FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 34, n. 3, p. 337-342, 2004.
- FERREIRA, N. C. M.; MAGALHÃES, A. F. Adsorção de fósforo em solos do Rio Grande do Sul. I – Aplicabilidade da isoterma de Langmuir na descrição da adsorção de fósforo no solo. **Agronomia Sulriograndense**, v. 10, n. 2, p. 281-288, 1974.
- GODINHO, V. P. C.; SAMPAIO, R. A.; VENEGAS, V. H. A.; RUIZ, H. A. Adsorção de fosfatos em três solos da região semiárida do Rio Grande do Norte. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 8, p. 819-823, 1997.
- GUILHERME, L. R. G.; CURTI, N.; SILVA, M. L. N.; RENÓ, N. B.; MACHADO, R. A. F. Adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 27-34, 2000.
- HARTER, R. B.; BAKER, D. E. Applications and misapplications of the Langmuir equation to soil adsorption phenomena. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 1077-1080, 1977.
- HOLFORD, I. C. R.; MATTINGLY, G. E. G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. **Plant and Soil**, v. 44, n. 1, p. 377-389, 1976.
- MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part I. The isotherms and the effect of pH on adsorption. **Journal of Soil Science**, v. 17, n. 2, p. 222-229, 1966a.
- MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part II. The location of the adsorption sites. **Journal of Soil Science**, v. 17, n. 2, p. 230-237, 1966b.
- MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite, and pseudoboehmite. Part III. The effect of temperature on adsorption. **Journal of Soil Science**, v. 17, n. 2, p. 238-247, 1966c.
- NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Parâmetros das isothermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, n. 1, p. 37-41, 1979a.
- NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E. J. Fósforo recuperado em três extratores químicos como função do fósforo aplicado no solo e do “fator capacidade”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 3, n. 1, p. 41-46, 1979b.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999.
- OLSEN, E. R.; WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 21, p. 144-149, 1957.
- PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B. Sorção de fósforo em alguns solos do semiárido do Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 7, p. 1179-1184, 1998.
- RANNO, S. K.; SILVA, L. S.; GATIBONI, L. C.; RHODEN, A. C. Capacidade de adsorção de fósforo em solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 21-28, 2007.
- VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

Received on April 28, 2008.

Accepted on April 13, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.