

# ADSORÇÃO DE FÓSFORO E SUA RELAÇÃO COM FORMAS DE FERRO EM DEZ SOLOS DO URUGUAI<sup>(1)</sup>

J. HERNÁNDEZ<sup>(2)</sup> & E. J. MEURER<sup>(3)</sup>

## RESUMO

Oxihidróxidos de ferro formam ligações químicas muito fortes com ânions fosfatos, diminuindo suas disponibilidades para as plantas. Este trabalho foi realizado em 1994 e 1995, com os objetivos de quantificar formas de ferro em solos do Uruguai e de relacioná-las com a adsorção de fósforo. Em amostras superficiais (0 a 15 cm) do horizonte A de dez solos, o ferro extraído com ditionito ( $Fe_d$ ) variou entre 1.598 e 8.592 mg kg<sup>-1</sup> e esteve relacionado com o material de origem. As formas de ferro de baixa cristalinidade, extraídas com oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> pH 3 ( $Fe_{03}$ ), representaram de 45 a 78% do total extraído com o ditionito. A capacidade máxima de adsorção de fósforo ( $K_2$ ), calculada a partir do modelo de Langmuir, variou de 104 a 704 mg kg<sup>-1</sup>. Encontrou-se correlação significativa ( $r = 0,894$ ,  $P < 0,01$ ) entre as formas de óxidos de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_{03}$ ) e a adsorção de fósforo pelos solos. A porcentagem de fósforo adsorvida pelos solos após a adição de 600 mg de P kg<sup>-1</sup> ( $P_{600}$ ) relacionou-se significativamente ( $r = 0,975$ ,  $P < 0,01$ ) com a capacidade máxima de adsorção de fósforo pelos solos. Também apresentou alta correlação ( $r = 0,894$ ,  $P < 0,01$ ) com as formas de ferro de baixa cristalinidade ( $Fe_{03}$ ), e pode ser utilizado como um índice para estimar a capacidade de adsorção de fósforo desses solos.

**Termos de indexação:** adsorção de fósforo, adsorção máxima, energia de ligação, equação de Langmuir, óxidos de ferro.

**SUMMARY:** *PHOSPHORUS SORPTION IN SOILS FROM URUGUAY AND ITS RELATIONSHIP WITH IRON OXIDES*

*Iron oxihydroxides form strong chemical bonds with phosphate anions, reducing P availability to plants. The objective of this study, conducted in 1994/95, was to quantify*

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Mestrado em Ciência do Solo do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul em agosto de 1996. Recebido para publicação em novembro de 1996 e aprovado em maio de 1998.

<sup>(2)</sup> Professor da Facultad de Agronomía. Universidad de la Republica. Montivideo, Uruguay.

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Caixa Postal 776, CEP 90001-970 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq.

*forms of iron oxides in soils from Uruguay, and to study their relationships with phosphorus sorption. Iron oxides extracted with dithionite-citrate-bicarbonate ( $Fe_d$ ) from ten soil samples (0-15 cm depth) ranged from 1598 to 8.592 mg kg<sup>-1</sup> and were related with their parent material. Poorly ordered Fe-oxihydroxides, extracted by 0.2 mol L<sup>-1</sup> ammonium oxalate at pH 3 ( $Fe_{03}$ ), ranged from 45.2 to 78.2% of the total iron oxides extracted by dithionite. The maximum P-sorption soil capacity ( $K_p$ ), estimated by the Langmuir equation, ranged from 104 to 704 mg kg<sup>-1</sup> of soil. The P sorption was strongly correlated ( $r = 0.894$ ,  $P < 0.01$ ) with the poorly ordered iron oxides ( $Fe_{03}$ ). The percent of phosphorus sorbed by soils after equilibrium with 600 mg kg<sup>-1</sup> P ( $P_{600}$ ), was significantly correlated ( $r = 0.975$ ,  $P < 0.01$ ) with the maximum P-sorption capacity and, with poorly crystalline Fe-minerals ( $r = 0.894$ ,  $P < 0.01$ ) extracted by the 0.2 mol L<sup>-1</sup> oxalate ammonium pH 3. This index can be used to estimate the P-sorption capacity of these soils.*

*Index terms: phosphorus sorption, maximum adsorption, binding energy, Langmuir equation, iron oxides.*

## INTRODUÇÃO

Os solos do Uruguai são naturalmente deficientes em fósforo, razão porque é necessária sua aplicação através de fertilizantes, para evitar limitações nutricionais para as culturas e pastagens. Entretanto, têm sido observadas diferenças entre solos, na eficiência de utilização de fósforo pelas plantas, relacionadas com processos de adsorção. Um dos fatores relativos à adsorção de fósforo em solos é o conteúdo de óxidos de ferro. Os solos do país apresentam, em geral, baixos teores totais de óxidos de ferro e proporções variáveis em formas de baixa cristalinidade (Cayssials & Puentes, 1974; Hernández et al., 1985). As formas de ferro de baixa cristalinidade apresentam maior área superficial específica, o que determina maior reatividade química com os fosfatos (Bromfield, 1965; Syers et al., 1971; Ballard & Fiskell, 1974; Madrid & Arambarri, 1985; Dick, 1986).

As variações no regime hídrico dos solos ocasionam variações temporais nas condições de oxidação-redução dos solos. Tais variações, associadas com altos teores naturais de matéria orgânica, podem determinar condições favoráveis à formação de compostos de ferro de baixa cristalinidade (Kämpf, 1988).

Diferentes métodos são utilizados para identificar as formas de ferro em solos. O método de redução pelo ditionito de sódio é o mais utilizado, para caracterizar a fração de óxidos de ferro livres (Mehra & Jackson, 1960). Esse tratamento dá como resultado a dissolução completa dos óxidos de ferro, sem diferenciar as distintas formas ou compostos que podem estar relacionados com os processos de adsorção do fósforo. As frações dos óxidos de ferro extraídas dos solos pelo oxalato de amônio a pH 3 têm-se relacionado com a adsorção do fósforo (Khalid et al., 1977; Willett et al., 1978; Willett & Higgins,

1978, 1980; Bradley et al., 1984). Sah et al. (1989) constataram que a fração de ferro extraída com oxalato de amônio a pH 6, antes da extração convencional a pH 3, apresentou melhor correlação com o fósforo adsorvido por solos sujeitos a períodos alternados de alagamento e drenagem. Esse método foi também utilizado por Vahl et al. (1993), para estimar, em amostras secas, o conteúdo de ferro que foi transformado ao estado reduzido após alagamento do solo para a cultura de arroz.

Os objetivos deste trabalho foram: a) quantificar os teores e formas de óxidos de ferro em dez solos do Uruguai, sujeitos a variações temporais nas condições de oxidação-redução, e b) relacionar esses teores e formas de ferro com a adsorção de fósforo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas amostras dos horizontes superficiais (0 a 15 cm) de dez solos do Uruguai, de importância na produção de pastagens e/ou sistemas mistos arroz-pastagens. A característica comum dos solos estudados é a de ocupar posições baixas da paisagem, pelo que estão sujeitos à alternância de períodos de excesso de água com períodos de seca, o que determina mudanças nas condições de oxidação-redução de duração variável. As amostras foram secas ao ar, moídas e peneiradas (malhas de 2 mm de diâmetro). Nos quadros 1 e 2, apresentam-se características selecionadas dos solos estudados.

### Caracterização das frações de ferro

Foram usados os seguintes métodos e extratores: a) ferro total extraído pelo ditionito de sódio ( $Fe_d$ ), avaliado pela técnica proposta por Kilmer (1960), modificada e descrita em Cayssials & Puentes (1974); duplicatas de 1,25 g de solo foram colocadas em tubos

**Quadro 1. Classificação, material de origem e teor de fósforo dos dez solos estudados (camada de 0-15 cm)**

Solo <sup>(1)</sup>	Material de origem	P-Bray	Argila <sup>(2)</sup>	Silte	Areia
		mg kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>		
1. Typic Argiudoll Colonia Palma	Sedimentos quaternários areno-argilosos	12	302	248	450
2. Typic Hapludert Itapebí	Sedimentos argilo-siltosos (intemperização do basalto)	8	460	420	120
3. Typic Argiudoll Algorta	Arenito do Cretáceo	14	100	99	801
4. Typic Argiudoll Bequeló	Loess do Mioceno	60	409	423	168
5. Albic Natraqualf La Charqueada	Sedimentos quaternários silto-argilosos	22	259	547	194
6. Typic Argiudoll Alférez	Sedimentos silto-arenosos (intemperização embasamento cristalino)	5	179	430	391
7. Typic Argiudoll Arroyo Blanco	Siltitos Permiano	7	219	309	472
8. Typic Argiudoll S.Gabriel-Guaycurú	Sedimentos silto-arenosos (intemperização do embasamento cristalino)	7	203	324	473
9. Typic Hapludert Kiyú	Sedimentos Quaternários silto-argilosos	11	453	465	82
10. Typic Albaquoll Kiyú	Siltitos do quaternário	15	308	561	131

<sup>(1)</sup> Classificação (EUA, 1992) e Unidade de Mapeamento (Uruguay, 1976). <sup>(2)</sup> Argila, silte e areia determinados pelo método Bouyoucus.

**Quadro 2. Características químicas dos solos estudados (camada de 0-15 cm de profundidade)**

Solo	C <sup>(1)</sup> orgânico	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Cátions trocáveis				T	V
				K	Ca	Mg	Na		
g kg <sup>-1</sup>		mmolc kg <sup>-1</sup>						%	
1	24	5,2	4,1	0,2	13	3	0,2	19	86
2	34	5,7	4,5	0,4	24	6	0,1	32	95
3	7	5,2	4,1	0,1	2	1	0,2	4	85
4	39	5,5	4,6	1,4	28	3	0,3	32	99
5	17	5,4	4,2	0,2	6	2	0,4	12	78
6	18	5,4	4,3	0,2	6	2	0,3	11	79
7	24	5,4	4,3	0,3	12	2	0,2	16	90
8	21	5,1	4,1	0,4	4	1	0,4	11	53
9	39	6,2	5,3	0,7	30	5	0,8	38	96
10	18	5,4	4,2	0,4	8	2	0,5	15	66

<sup>(1)</sup> C orgânico determinado pelo método de Walkley-Black; pH determinado na relação solo:solução 1:2,5; CTC e cátions avaliados pelo método por acetato de amônio 1 mol L<sup>-1</sup> a pH 7.

de centrifuga de 50 ml, junto com 1,25 g de ditionito de sódio e 25 ml de água deionizada, e agitadas durante 16 h. A suspensão foi diluída até 60 ml com água destilada, ajustando o pH na faixa de 3,5-4,0, e, após filtrada e diluída até 100 ml, foi determinado o conteúdo de ferro; b) ferro extraído pelo oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 3 (Fe<sub>o3</sub>), avaliado pela técnica ajustada por Schwertmann (1973) e descrita em Tedesco et al. (1985), pela qual as amostras dos solos foram agitadas na ausência de luz com oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup>, por duas horas, após as quais as suspensões foram centrifugadas, determinado-se

o teor ferro na solução; c) ferro extraído pelo oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 6 (Fe<sub>o6</sub>): esse método difere do anterior somente no pH da solução extratora; d) ferro extraído, seqüencialmente, por uma solução de HCl 8 mol L<sup>-1</sup>, avaliado pela técnica proposta por Segalen e descrita por Cayssials & Puentes (1974). Na mesma amostra de solo, foi realizada uma seqüência de oito extrações, de 30 s cada, com HCl 8 mol L<sup>-1</sup>, centrifugando-se e determinando-se o teor de ferro em cada extrato. Posteriormente, foram plotados em um gráfico os dados de extração acumulada de ferro em função do

número de extração. Com os valores acumulados correspondentes às extrações três a oito, ajustou-se uma reta. A extrapolação da reta corta o eixo das ordenadas (Y) num ponto onde o valor de ferro extraído corresponde às formas de menor cristalinidade ( $Fe_{mc}$ ). O ferro total extraído nas oito extrações é equivalente ao ferro total presente em óxidos ( $Fe_{tc}$ ).

### Avaliação da adsorção de fósforo

Em tubos de centrífuga de 50 ml, equilibraram-se duplicatas de 2,5 g de solo com 25 ml de uma solução de  $CaCl_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>, com concentrações variáveis de fósforo adicionado como  $Ca(H_2PO_4)_2$ . As concentrações de fósforo nas soluções foram de 0, 5, 10, 15, 25, 40, 60 e 100 mg L<sup>-1</sup>, equivalentes a adições de 0, 50, 100, 150, 250, 400, 600 e 1.000 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo, respectivamente. Para inibir a flora microbiana, foram adicionadas duas gotas de tolueno. As amostras dos solos foram equilibradas com as soluções, durante 18 h a 25°C num agitador recíproco (50 ciclos por minuto), centrifugadas e filtradas. O teor de fósforo na solução foi determinado pelo método da redução seletiva com cloreto de estanho, depois da adição de molibdato de amônio. O fósforo adsorvido pela fase sólida foi calculado por diferença entre o fósforo adicionado e o quantificado na solução de equilíbrio, depois de prévia correção do fósforo inicialmente presente na solução. Os valores obtidos para cada solo foram ajustados à equação de Langmuir de acordo com:

$$x/m = K_1 K_2 C / (1 + K_1 C)$$

em que

$x/m$  = quantidade de P adsorvido por unidade de peso de solo;

$K_1$  = constante relacionada com energia de ligação;

$K_2$  = adsorção máxima;

C = concentração de equilíbrio de P.

Da linearização da equação de Langmuir [ $C/x/m = (1/K_1 K_2) + C/K_2$ ], calcularam-se  $K_2$  (gradiente<sup>-1</sup>) e  $K_1$  (gradiente/intercepto).

Os índices  $P_{150}$  e  $P_{600}$  representam a porcentagem de fósforo adsorvido pelo solo com a adição equivalente a 150 e 600 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo.

Com os dados obtidos, realizaram-se análises de regressão e correlação. Foram adotados os procedimentos PROC REG e PROC CORR (SAS Institute, 1985). Para comparar os parâmetros nas equações de regressão, utilizou-se o programa MSTAT-C (Nissen, 1989).

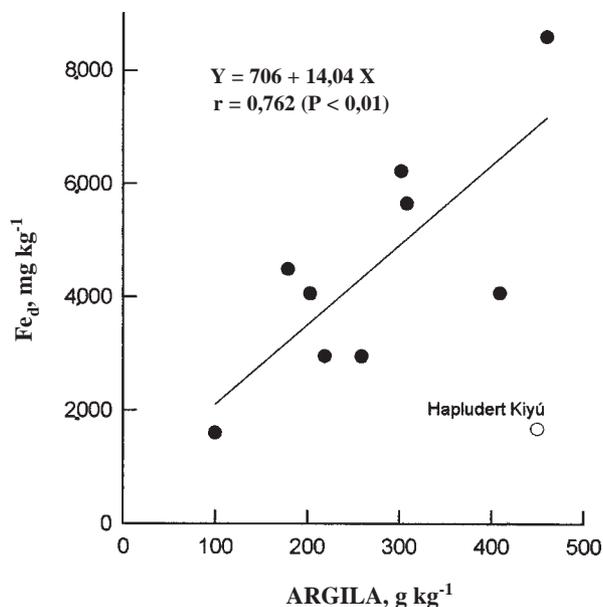
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As quantidades de ferro extraídas pelo ditionito ( $Fe_d$ ) variaram, entre os solos, de 1.598 a 8.592 mg kg<sup>-1</sup> de solo, tendo sido encontrado o teor mais elevado no solo desenvolvido a partir de materiais quaternários (solo 2, Hapludert Itapebi) com influência da alteração de basalto (Quadro 3). O solo que apresentou o menor teor de ferro (solo 3, Argiudoll Algorta) foi desenvolvido a partir de arenitos do Cretáceo, que revelaram baixos teores de argila (Quadro 1). Com a exceção do Hapludert Kiyu, para os demais solos, encontrou-se uma correlação entre o ferro extraído pelo ditionito ( $Fe_d$ ) e o teor de argila dos solos (Figura 1), o que indica que a alta proporção dos óxidos de ferro nesses solos encontra-se associada às frações finas.

Quadro 3. Teores totais, frações e valores relativos de óxidos de ferro em dez solos do Uruguai

Solo	$Fe_d^{(1)}$	$Fe_{03}^{(2)}$	$Fe_{06}^{(3)}$	$Fe_{tc}^{(4)}$	$Fe_{mc}^{(5)}$	$Fe_{03}$	$Fe_{06}$	$Fe_{06}$	$Fe_d$	$Fe_{mc}$	$Fe_{03}$
	mg kg <sup>-1</sup>					%					
1	6.220	4.013	508	7.021	5.932	64	8	13	89	84	68
2	8.592	6.235	1.642	8.879	7.592	73	19	26	97	86	82
3	1.598	837	242	2.553	2.147	52	15	28	63	84	39
4	4.070	1.838	424	3.078	1.918	45	10	23	132	62	968
5	2.955	1.732	792	2.374	1.737	59	27	46	124	73	100
6	4.490	2.908	508	4.877	3.552	65	11	18	92	73	82
7	2.957	2.308	417	3.366	2.514	78	14	18	88	75	92
8	4.060	3.175	855	4.717	3.663	78	21	26	86	78	87
9	1.887	1.075	81	2.730	1.383	57	4	8	69	51	787
10	5.653	3.633	758	5.643	3.993	64	13	21	100	71	91
Média	4.248	2.775	623	4.524	3.443	64	14	23	94	74	81

<sup>(1)</sup> $Fe_d$  = extração com ditionito; <sup>(2)</sup> $Fe_{03}$  = extração com oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 3. <sup>(3)</sup> $Fe_{06}$  = extração com oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 6. <sup>(4)</sup> $Fe_{tc}$  = total da extração seqüencial com HCl 8 mol L<sup>-1</sup>; <sup>(5)</sup> $Fe_{mc}$  = calculado por extrapolação da curva de extração seqüencial.



**Figura 1. Relação entre a fração de ferro extraída por ditonito de sódio ( $Fe_d$ ) e o teor de argila dos solos.**

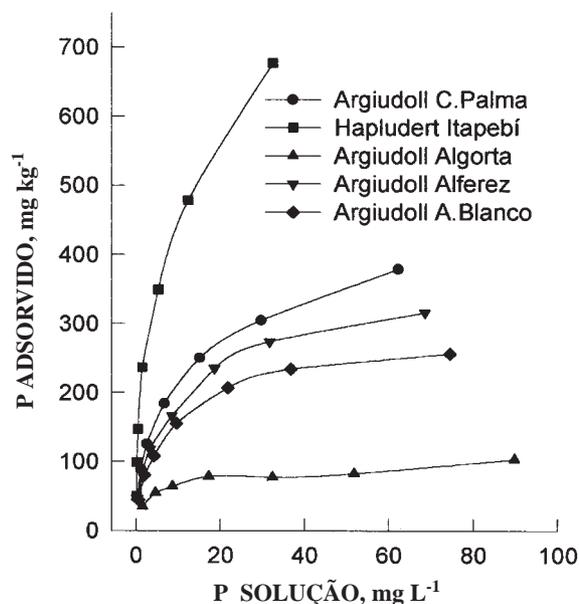
As quantidades de ferro extraídas pelo oxalato de amônio a pH 3 ( $Fe_{03}$ ) variaram de 837 a 6.235  $mg\ kg^{-1}$ , 45 a 78% das quantidades extraídas pelo ditonito, ficando a média para os dez solos em 64% (Quadro 3). Isto indica que, na maioria desses solos, mais da metade dos óxidos de ferro estão sob formas de baixa cristalinidade. As condições de formação dos solos, com períodos alternados de oxidação-redução, constituem causas prováveis dessa alta proporção (Munch et al., 1978; Blume, 1988). O oxalato de amônio a pH 6 ( $Fe_{06}$ ) extraiu menores quantidades de ferro que o oxalato a pH 3 (Quadro 3), correspondendo, na média, a 23% da fração extraída pelo  $Fe_{03}$ . O Natraqualf La Charqueada apresentou a maior relação  $Fe_{06}/Fe_{03}$  (46%) entre os solos estudados; trata-se de um solo que ocupa posições baixas e planas da paisagem, com um horizonte subsuperficial argiloso muito desenvolvido, que afeta a drenagem interna; é um dos principais solos cultivados com arroz no país.

As quantidades de ferro extraídas sequencialmente pelo HCl 8 mol  $L^{-1}$  ( $Fe_{tc}$ ) foram, na média, cerca de 6% superiores às extraídas pelo ditonito; entretanto, em três solos, foram inferiores. Similarmente, as quantidades correspondentes às formas de menor cristalinidade ( $Fe_{mc}$ ), calculadas a partir da extração sequencial pela extrapolação da curva ao eixo das ordenadas, foram superiores (relação  $Fe_{03}/Fe_{mc} = 81\%$ ) às extraídas pelo oxalato de amônio a pH 3 (Quadro 3).

Na figura 2, são apresentadas as isotermas de adsorção de fósforo correspondentes a cinco dos dez

solos estudados. Observou-se a relação direta entre as quantidades de fósforo adsorvidas e as quantidades de óxidos de ferro presentes: o Hapludert Itapebí, com maiores teores, mostrou máxima adsorção de fósforo, enquanto o Argiudoll Algorta, com menores teores, revelou menor adsorção. As curvas de adsorção dos cinco solos não apresentadas na figura 2 são semelhantes ou intermediárias às curvas de adsorção plotadas.

Os índices de adsorção de fósforo para os dez solos estão no quadro 4. A capacidade máxima de adsorção de fósforo ( $1/K_2$ ) variou, entre solos, de 104 a 704  $mg\ kg^{-1}$ . Os valores para os índices  $P_{150}$  situaram-se entre 42 e 98%, ao passo que o índice para o  $P_{600}$  ficou entre 14 e 80%. Altos teores de sesquióxidos de ferro são, muitas vezes, considerados como o fator determinante da adsorção do fósforo em solos (Uehara & Gillman, 1981). As formas de baixa cristalinidade devem fixar mais fósforo que as cristalinas. Neste trabalho, encontraram-se baixas correlações (Quadro 5) entre os índices de adsorção de fósforo e as formas cristalizadas de sesquióxidos de ferro. Isto é, a diferença  $Fe_d - Fe_{03}$ , que é considerada boa estimativa das formas cristalinas de ferro (Smith & Mitchell, 1987; Delvaux et al., 1989) e a diferença  $Fe_{tc} - Fe_{mc}$ , que também indicaria as formas cristalinas, apresentaram baixos coeficientes de correlação com os índices de adsorção de fósforo (Quadro 5). O índice de adsorção máxima de fósforo ( $K_2$ ) correlacionou-se significativamente ( $r = 0,894$ ,  $P < 0,01$ ) com a quantidade de óxidos de ferro extraída pelo oxalato de amônio 0,2 mol  $L^{-1}$  ( $Fe_{03}$ ) a pH 3 (Figura 3).



**Figura 2. Isotermas de adsorção em cinco solos selecionados.**

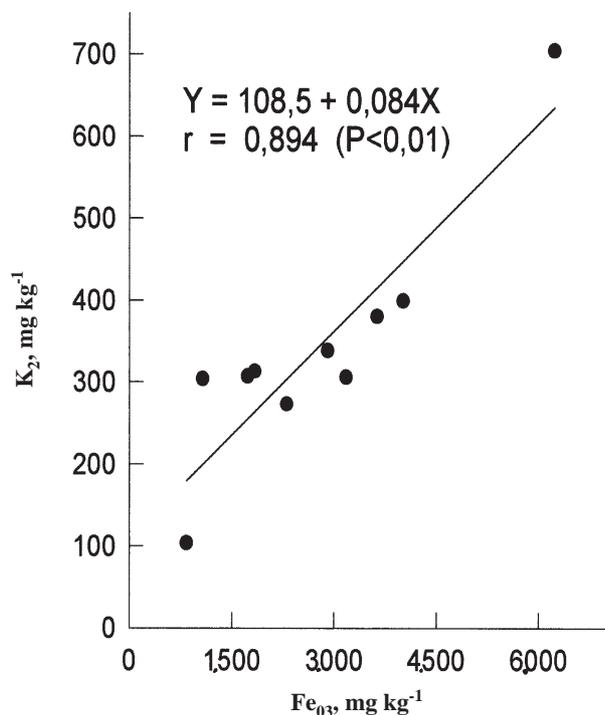


Figura 3. Relação entre o teor de óxido de ferro extraído pelo oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> pH 3 e a capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos.

Outros autores encontraram altas correlações entre a adsorção de fósforo e o ferro extraído pelo oxalato de amônio a pH 3 (Bromfield, 1965; Sree Ramulu et al., 1967; Lewis et al., 1981; Molina et al., 1991; Soon, 1991). Uma comprovação da alta capacidade dessa fração dos óxidos de ferro de reagir com o fósforo foi obtida por Syers et al. (1971), que encontraram, após remoção da fração dos óxidos de ferro pelo oxalato de amônio a pH 3, redução da adsorção de fósforo em amostras de solos do Rio Grande do Sul.

O índice P<sub>600</sub> correlacionou-se significativamente ( $r = 0,975$ ,  $p < 0,01$ ) com a capacidade máxima de adsorção dos solos (Quadro 5) e ( $r = 0,894$ ,  $P < 0,01$ ) com as formas de ferro (Fe<sub>03</sub>) de baixa cristalinidade (Figura 4), podendo ser, também, utilizado como um índice para estimar a capacidade de adsorção de fósforo desses solos.

As relações dos índices de adsorção de fósforo com Fe<sub>mc</sub>, embora significativas, apresentaram coeficientes de correlação mais baixos (Quadro 5).

A constante K<sub>1</sub>, relacionada com a energia de adsorção, mostrou um coeficiente elevado para Fe<sub>06</sub>, o qual apresentou menor correlação com o parâmetro K<sub>2</sub> do que o Fe<sub>03</sub>, e uma correlação baixa com o P<sub>600</sub> ( $r = 0,678$ ,  $P < 0,01$ ). Segundo Willett & Cunningham

Quadro 4. Coeficientes da equação linearizada de Langmuir (a = intercepção e b = declividade), coeficientes de correlação (r), adsorção máxima (K<sub>2</sub>), energia de ligação (K<sub>1</sub>) e porcentagem de fósforo adsorvido pelos solos com a adição de 150 mg kg<sup>-1</sup> de P de solo (P<sub>150</sub>) e de 600 mg kg<sup>-1</sup> de P de solo (P<sub>600</sub>)

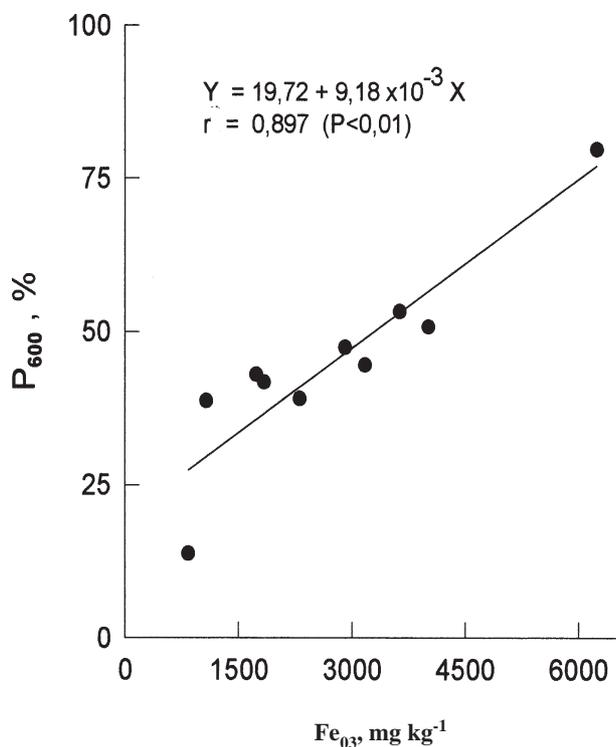
Solo	a x 10 <sup>-2</sup>	b x 10 <sup>-3</sup>	r	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	P <sub>150</sub>	P <sub>600</sub>
						— % —	
1	1,46	2,5	0,992**	400	0,170	84	51
2	0,4	1,42	0,986**	704	0,355	98	80
3	5,93	9,64	0,090**	104	0,162	43	14
4	2,98	3,19	0,992*	313	0,107	73	42
5	1,62	3,26	0,996**	307	0,201	79	43
6	1,77	2,97	0,996**	334	0,168	79	47
7	2,1	3,66	0,998**	273	0,174	72	39
8	1,45	3,27	0,996**	306	0,226	83	44
9	3,09	3,29	0,992**	304	0,106	69	39
10	1,25	2,63	0,996**	380	0,210	86	53

\*\* significativo ao nível de 1%.

Quadro 5. Coeficientes de correlação (r) e suas probabilidades de significância, entre a capacidade máxima de adsorção de fósforo (K<sub>2</sub>), energia de ligação (K<sub>1</sub>), índices P<sub>150</sub> e P<sub>600</sub> e formas de ferro nos dez solos estudados

Forma de ferro	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	P <sub>150</sub>	P <sub>600</sub>
K <sub>1</sub>	0,714 0,01	- -	- -	- -
P <sub>150</sub>	0,848 0,01	0,557 0,05	- -	- -
P <sub>600</sub>	0,975 0,01	0,678 0,02	- -	- -
Fe <sub>03</sub> <sup>(1)</sup>	0,894 0,01	0,800 0,01	0,812 0,01	0,894 0,01
Fe <sub>06</sub> <sup>(2)</sup>	0,806 0,01	0,949 0,01	0,714 0,01	0,800 0,01
Fe <sub>mc</sub> <sup>(3)</sup>	0,800 0,01	0,748 0,01	0,640 0,03	0,762 0,01
Fe <sub>d</sub> -Fe <sub>03</sub>	0,648 0,02	0,100 0,32	0,557 0,06	0,640 0,03
Fe <sub>tc</sub> -Fe <sub>mc</sub> <sup>(4)</sup>	0,469 0,09	0,332 0,76	0,574 0,05	0,557 0,05

<sup>(1)</sup> extração com oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 3. <sup>(2)</sup> extração com oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 6. <sup>(3)</sup> calculado a partir de Fe<sub>tc</sub>; intercepção da reta de regressão com os eixos das ordenadas (vide texto). <sup>(4)</sup> Fe<sub>tc</sub> = total da extração sequencial com HCl 8 mol L<sup>-1</sup>.



**Figura 4. Relação entre os óxidos de ferro extraídos pelo oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 3 e a porcentagem de fósforo adsorvida pelos solos com a adição de uma dose de fósforo equivalente a 600 mg kg<sup>-1</sup> de solo.**

(1983), o significado físico-químico dessa constante não é muito claro, como o parâmetro que estima a adsorção máxima do fósforo (K<sub>2</sub>).

### CONCLUSÕES

1. Os teores de óxidos de ferro extraídos pelo ditionito (Fe<sub>d</sub>) variaram de 1.598 a 8.592 mg kg<sup>-1</sup>, sendo diretamente relacionados com o teor de argila dos solos, determinados pelo material de origem.

2. A capacidade máxima de adsorção de fósforo variou de 104 a 704 mg kg<sup>-1</sup> de solo e correlacionou-se significativamente com as formas de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, que representaram de 45 a 78% do total extraído pelo ditionito (Fe<sub>03</sub>/F<sub>d</sub>).

3. A porcentagem de fósforo adsorvida após a adição de 600 mg de P kg<sup>-1</sup> de solo (P<sub>600</sub>) apresentou alta correlação com a capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos e com as formas de ferro de baixa cristalinidade. Tal índice pode ser utilizado para estimar a adsorção de fósforo nesses solos.

### LITERATURA CITADA

- BALLARD, R. & FISKELL, J.G.A. Phosphorus reaction in Coastal Plain Forest soils: I. Relationship to soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:250-255, 1974.
- BLUME, H.P. The fate of iron during soil formation in humid-temperate environments. In: STUCKI, J.W., ed. *Iron in soils and clay minerals*. Holland, D. Reidel Publishing, 1988. p.749-777.
- BRADLEY, J.; VIMPANY, I. & NICHOLLS, P.J. Effects of water logging and subsequent drainage of a pasture soil on phosphate sorption, extractable phosphate and oxalate-extractable iron. *Aust. J. Soil Res.*, 22:455-461, 1984.
- BROMFIELD, I.S.M. Studies of the relative importance of iron and aluminum in the sorption of phosphate by some australian soils. *Aust. J. Soil Res.*, 3:31-44, 1965.
- CAYSSIALS, R. & PUENTES, R. Determinación y fraccionamiento de hierro y aluminio libre en algunos suelos del Uruguay. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1974. 88p. (Tesis Ingeniero Agrônomo)
- DELVAUX, B.; HERBILLON, A.J. & VIELVOYE, L. Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon. *Taxonomic, mineralogical and agronomic implications*. *Geoderma*, 45:375-388, 1989.
- DICK, D.P. Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B latossólicos. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1986. 196p. (Tese de Mestrado)
- ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. *Soil Survey Staff. Keys to soil taxonomy*, 5. Blaksburg, Pocahontas, 1992. 56p. (SMSS Technical Monograph, 19)
- HERNANDEZ, J.; OTEGUI, O. & ZAMALVIDE, J.P. Formas y contenidos de fósforo en algunos suelos del Uruguay. Montevideo, Facultad de Agronomía, 1985. 32p. (Boletín de Investigaciones, 43)
- KÄMPF, N. O ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1., Goiania, 1988. *Anais. Goiânia, EMBRAPA-CNAF*, 1988. p.35-71 (Documentos, 22).
- KHALID, R.A.; PATRICK, W.H. & DE LAUNE, R.D. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:305-310, 1977.
- KILMER, V. The estimation of free iron oxides in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24:420-421, 1960.
- LEWIS, D.L.; CLARKE, A.L. & HALL., W.B. Factors affecting the retention of phosphorus applied as Superphosphate to the Sandy soils in South-eastern South Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 19:167-174, 1981.
- MADRID, L. & DE ARAMBARRI, P. Adsorption of phosphate by two iron oxides in relation to their porosity. *J. Soil Sci.*, 36:523-530, 1985.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE CLAYS & CLAY MINERALS, 7., Ottawa, 1960. *Proceedings*. Ottawa, 1960. p.317-327.

- MOLINA, E.; BORNEMISZA, N.; SANCHO, F. & KASS, D.L. Soil aluminum and iron fractions and their relationships with P immobilization and other soil properties in andisols of Costa Rica and Panama. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 22:1459-1476, 1991.
- MUNCH, J.C.; HILLEBRAND, T.H. & OTTOW, J.C.G. Transformations in the Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> ratio of pedogenic iron oxides affected by iron-reducing bacteria. *Can. J. Soil Sci.*, 58:475-486, 1978.
- NISSEN, O. MSTAT-C: Microcomputer Statistical Program. Ann Arbor, Michigan State University, 1989. p.104-106.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. & HAFEZ, A.A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1723-1729, 1989.
- SAS Institute, Inc. SAS User's Guide: Statistics. Cary, 1985.
- SCHWERTMANN, U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. *Can. J. Soil Sci.*, 53:224-246, 1973.
- SMITH, B.F.L. & MITCHELL, B.D. Characterization of poorly ordered minerals by selective chemical methods. In: WILSON, M.J., ed. A handbook of determinative methods in clay mineralogy. New York, Blackie, 1987. p.275-294.
- SOON, Y.K. Solubility and retention of phosphate in soils of the northwestern Canadian prairie. *Can. J. Soil Sci.*, 71:453-463, 1991.
- SREE RAMULU, U.S.; PRATT, P.F. & PAGE, A.L. Phosphorus fixation by soils in relation to extractable iron oxides and mineralogical composition. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:193-196, 1967.
- SYERS, J.K.; EVANS, T.D.; WILLIAMS, J.D.H. & MURDOCK, J.T. Phosphate sorption parameters of representative soils from Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil Sci.*, 112:267-275, 1971.
- TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J. & BOHNEN, H. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 188p. (UFRGS. Boletim Técnico, 5)
- UEHARA G. & GILLMAN G. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. Boulder, Westview Press, 1981.
- URUGUAY. Ministerio de Agricultura Y Pesca. Dirección de Suelos Y Fertilizantes. Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay. Montevideo, 1976.
- VAHL, L.C.; ANGHINONI, I. & KAMPF, N. Previsão da acumulação de ferro (II) trocável no solo durante o alagamento através de análise química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 24., 1993. Goiânia, Resumos expandidos. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. p.183-184.
- WILLET, I.R. & CUNNINGHAM, R.B. Influence of sorbed phosphate on the stability of ferric hydrous oxide under controlled pH and Eh conditions. *Aust. J. Soil Res.*, 21:301-308, 1983.
- WILLET, I.R. & HIGGINS, M.L. Phosphate sorption by reduced and reoxidized rice soils. *Aust. J. Soil Res.*, 16:319-326, 1978.
- WILLET, I.R.; MUIRHEAD, W.A. & HIGGINS, M.L. The effects of rice growing on soil phosphorus immobilization. *Aust. Exp. Agric. Anim. Husb.*, 18:270-275, 1978.
- WILLET, I.R. & HIGGINS, M.L. Phosphate sorption and extractable iron in soils during irrigated rice-upland crop rotations. *Aust. Exp. Agric. Anim. Husb.*, 20:346-353, 1980.