

**ISOTERMAS DE ADSORCION DE FOSFORO EN SUELOS ARGENTINOS:
II. Aplicabilidad de las isotermas e interrelación de sus parámetros
con variables de suelo y planta**

R. E. Mendoza

Centro de Ecofisiología Vegetal (CONICET - FECIC - FUND. MIGUEL LILLO).
Serrano 665. 1414 Capital Federal. Argentina

RESUMEN

Se estudió en diez suelos argentinos la utilidad del empleo de los parámetros que caracterizan las isotermas de adsorción de fósforo. Para los estudios se empleó la regresión lineal múltiple entre los parámetros de las isotermas (Freundlich, doble Langmuir y Gunary) y algunas variables medidas en los suelos y en plantas de "rye grass". Los parámetros que representan la capacidad relativa de adsorción y la capacidad reguladora de fosfato estuvieron altamente correlacionadas entre sí. Los que representan la afinidad entre adsorbente y adsorbente también correlacionaron entre ellos. La capacidad relativa de adsorción y la capacidad reguladora de fosfato del suelo estuvieron asociadas directamente con la cantidad de fósforo requerido en el suelo para obtener máximos rendimientos. Sin embargo, aquellas propiedades no correlacionaron con el fósforo absorbido por las plantas de "rye grass". El aluminio extractado de los suelos contribuyó en más del 50% en la variación en el valor de los parámetros asociados con la capacidad reguladora. El empleo de los parámetros de las ecuaciones de adsorción proporcionan una valiosa información acerca de ciertas propiedades del suelo como también indicios sobre la adsorción y requerimientos de fósforo en las plantas.

Palabras claves: isotermas de adsorción de fósforo, relación entre parámetros, variables de suelo y planta.

**PHOSPHATE ADSORPTION ISOTHERMS IN ARGENTINEAN SOILS:
II. Usefulness of the isotherms and relationship between their
parameters and soil and plant variables**

ABSTRACT

The usefulness of the parameters of phosphate adsorption isotherms was studied in ten Argentinien soils. The multilinear regression technique was used to relate the parameters of equations (Freundlich, double Langmuir and Gunary) to some soil and plant variables. The sorption parameters were highly correlated between them. The affinity coefficients of equations were also correlated. The relative phosphate adsorption and the buffering capacity were related to phosphate requirements to produce maximum yield. However, these properties did not show correlation to P-uptake. The regression relationship suggested that aluminium extracted from soils accounted for more than 50% of the variation of the buffering capacity. The parameters of phosphate adsorption isotherm give a valuable information about soil properties and phosphate requirements of plants.

Key words: phosphate adsorption isotherms, parameters of equations, soil-plant phosphate variables.

INTRODUCCION

Una de las razones que han motivado a los científicos a describir la fijación de fósforo en el suelo mediante el empleo de las isotermas de adsorción ha sido la de resumir en el valor de algunos parámetros parte del comportamiento de la reacción entre el fósforo y el suelo. Los parámetros y coeficientes derivados a partir del ajuste de los valores experimentales del fósforo absorbido y del fósforo en solución han sido corrientemente relacionados con distintas propiedades del suelo (Olsen y Watanabe, 1957; Fitter y Sutton, 1975; Mead, 1981; Bolan, 1983), con la disponibilidad de fósforo para las plantas (Holford y Mattingly, 1976; Holford, 1979) y también con la cantidad de fósforo requerida para producir máximos rendimientos (Ozanne y Shaw, 1967; Fox y Kamprath, 1970; Barrow, 1975; Mendoza, 1980). Estas relaciones se efectuaron con el propósito de encontrar algún tipo de asociación entre las variables e inferir luego acerca de las propiedades medidas en el suelo y en la planta relacionadas con la adsorción de fósforo en el suelo.

Unas de las ecuaciones de adsorción más utilizadas para estos estudios han sido las de Freundlich y doble Langmuir (Holford y Mattingly, 1976 a, b; Mead, 1981; Holford, 1982; Bolan, 1983). Estudios previos realizados en un grupo de suelos argentinos demostraron que estas dos ecuaciones, juntamente con la de Gunary, describieron la adsorción de fósforo con mayor precisión que otras ecuaciones utilizadas corrientemente (Mendoza, 1986). Se han utilizado muchos parámetros y coeficientes derivados a partir de las ecuaciones de adsorción como caracterizadores de la reacción entre el fósforo y el suelo, sin embargo los más comúnmente utilizados han sido los asociados con la capacidad reguladora de fosfato del suelo (Beckett y White, 1964; Barrow, 1967; Holford, 1979; Mead, 1981). Esta propiedad es una de las más importantes en relación con la disponibilidad de fósforo para las plantas, debido a que controla la relación dinámica del fósforo entre las fases sólida y líquida del suelo. Diversos índices que representan la capacidad reguladora han sido utilizados en los estudios existentes; sin embargo, el valor de la pendiente máxima de la isoterma de adsorción en el caso de la ecuación doble Langmuir (Holford y Mattingly, 1976 a), y el valor del coeficiente lineal en el caso de la ecuación de Freundlich (Barrow, 1980; Holford, 1982) han sido los más empleados como medidas relacionadas con la capacidad reguladora de fosfato del suelo.

Existen en el mundo numerosos trabajos en donde los parámetros y coeficientes de las ecuaciones de adsorción han sido utilizados en estudios de correlación con variables medidas en el suelo y en la planta; sin embargo no existe tal información en estudios realizados con suelos argentinos. Este es precisamente el objetivo de este artículo, donde se relacionan los valores de los parámetros y coeficientes de las ecuaciones de adsorción de fósforo en el suelo con algunas variables medidas en el suelo y en las plantas.

MATERIALES Y METODOS

Suelos, isotermas de adsorción

En el artículo anterior de esta serie se ha detallado acerca de las características de los diez suelos utilizados en esta experiencia, de la metodología utilizada para el ajuste de las ecuaciones de adsorción y de la comparación estadística entre ecuaciones (Mendoza, 1986). Allí se había demostrado que las ecuaciones de Freundlich, doble Langmuir y Gunary describieron la relación entre el fósforo adsorbido (Pd) y el fósforo en solución (c) con mayor precisión que otras ecuaciones de ajuste, razón por la cual el presente estudio sólo se ocupa de estas tres ecuaciones.

Ecuación de Freundlich

$$Pd = ac^b \quad (1)$$

donde el coeficiente a representa la cantidad de fósforo adsorbido cuando la concentración en la solución es igual a la unidad y ha sido utilizado como índice de la capacidad relativa de adsorción (Barrow, 1980). Sin embargo, el valor de a también ha sido empleado como una medida de íntima relación con la capacidad reguladora de fosfato del suelo (Holford, 1982). El coeficiente b está asociado a la afinidad entre el fósforo y el suelo. Algunos autores han utilizado la inversa del exponente de Freundlich (1/b) como representante del factor afinidad, debido a que existe una relación inversa entre el valor de b y la pendiente inicial de la isoterma de adsorción, como también una relación directa de b con el fósforo absorbido por las plantas (Holford, 1982).

Ecuación doble Langmuir

$$Pd = \frac{k_1 x m_1 c}{1 + k_1 c} + \frac{k_2 x m_2 c}{1 + k_2 c} \quad (2)$$

donde la sumatoria de $xm_1 + xm_2$ representa la adsorción máxima ($\mu\text{ g/g}$) y la sumatoria de $k_1 + k_2$ representa el factor afinidad. El valor de la pendiente máxima de la isoterma, cuando c tiende a cero, está dado por la sumatoria de $k_1 xm_1 + k_2 xm_2$ (Holford, 1976 a), sus unidades son (mL/g). Este índice representa a la máxima capacidad reguladora de fosfato y será denominado en adelante con la letra S.

Ecuación de Gunary

$$Pd = \frac{1}{A + \frac{B}{c} + \frac{D}{\sqrt{c}}} \quad (3)$$

donde el valor de $1/B$ es asociado a la adsorción máxima ($\mu\text{ g/g}$); el resto de los coeficientes carecen de significado práctico, por lo que esta ecuación ha sido utilizada solamente para la descripción empírica de los datos experimentales.

Ensayo de invernáculo

Se cultivaron plantas de "rye grass" (*Lolium perenne* L. cv. "El Cencerro"), en macetas de 1250 cm^3 que contenían muestras de 1 kg de los diez suelos estudiados en un número de ocho por maceta. En cada suelo se emplearon cinco niveles de fósforo (KH_2PO_4), elegidos de manera tal de poder definir claramente la curva de producción. Los tratamientos se repitieron cuatro veces y el período de crecimiento de las plantas fue de 150 días durante los cuales se realizaron cinco cosechas de los vástagos a los 35, 63, 91, 119 y 150 días contados a partir de la siembra.

Al comienzo y durante el período de crecimiento las plantas recibieron una dosis basal de nutrientes exceptuando fósforo. También se agregaron 280 mg de nitrógeno (NO_3NH_4) por maceta distribuidos en ocho veces durante los 150 días de crecimiento de las plantas. El material vegetal cosechado se secó en estufa, se pesó y se determinó el contenido de fósforo por el método del amarillo del complejo vanadomolibdofosfórico en medio nítrico (Jackson, 1964), previa digestión del material en una mezcla nítrico-perclórica.

Curva de producción

La producción de materia seca acumulada al cabo

de 150 días de crecimiento se ajustó en función de los niveles de fósforo aplicado, utilizando la siguiente ecuación:

$$y = M - N \exp(-zx) \quad (4)$$

donde y es la producción de materia seca (g/maceta), x es el fósforo incorporado al suelo (mg/maceta) y M , N y z son coeficientes. M representa la máxima producción, $M-N$ la producción obtenida sin la incorporación de fósforo y z es el coeficiente que determina la curvatura de la línea de ajuste.

Variables utilizadas en los estudios de regresión

Para estudiar la relación entre los parámetros y coeficientes derivados a partir de las ecuaciones de adsorción con las variables medidas en el suelo y en las plantas, se utilizó la regresión lineal múltiple. Las variables utilizadas en el estudio fueron:

Variables medidas en el suelo

1. pH en Cl_2Ca 0,01 M; relación 1:5
2. Porcentaje de arcilla (arc)
3. Porcentaje de materia orgánica (MO)
4. Porcentaje de aluminio extractable (A1) (Mc Keague y Day, 1966)
5. Porcentaje de hierro extractable (Fe) (Mc Keague y Day, 1966).

Variables medidas a partir de las ecuaciones de adsorción

1. Capacidad relativa de adsorción en la ecuación de Freundlich (a), en la ecuación doble Langmuir ($xm_1 + xm_2$) y en la ecuación de Gunary ($1/B$).
2. Factor afinidad en la ecuación de Freundlich ($1/b$) y en la ecuación doble Langmuir ($k_1 + k_2$)
3. Capacidad reguladora de fosfato en la ecuación doble Langmuir cuando c tiende a cero (S).

Variables relacionadas con el crecimiento de las plantas de "rye grass"

1. Fósforo absorbido por las plantas (mg/maceta) en los suelos sin fertilizar con fósforo a los 35 (P_{35}) y a los 150 días (P_{150}) del período de crecimiento.
2. Fósforo requerido (mg/maceta) para producir el 90% de la máxima producción calculado a partir de la Ec. (4) (P_{90}).

Tabla 1. Matriz de correlación entre los parámetros de las ecuaciones de Freundlich, doble Langmuir y Gunary para los diez suelos estudiados.

VARIABLES	$k_1 + k_2$	$xm_1 + xm_2$	S	1/B	a
b	-0,633	-0,410	-0,547	-0,357	-0,520
$k_1 + k_2$		0,282	0,474	0,462	0,356
$xm_1 + xm_2$			0,930	0,891	0,979
S				0,809	0,979
1/B					0,844

$P < 0,05$, $r = 0,632$; $P < 0,01$, $r = 0,765$; $P < 0,001$, $r = 0,872$

La significancia de los valores de F para la comparación de las ecuaciones de las variables de suelo en las tablas correspondientes, se obtuvieron a partir de las diferencias en las sumas residuales de las desviaciones entre los valores observados y calculados (Mendoza, 1986).

RESULTADOS

Interrelación entre los parámetros de las ecuaciones de adsorción

Los parámetros de las ecuaciones que representan la capacidad relativa de adsorción y la capacidad buffer de fosfato (a , $xm_1 + xm_2$, $1/B$ y S respectivamente) estuvieron altamente correlacionados ($P < 0,01$) (Tabla 1). Las mejores correlaciones se obtuvieron entre los valores de a con $xm_1 + xm_2$ y con S . Los parámetros asociados con la propiedad afinidad entre el fósforo y el suelo (b y $k_1 + k_2$) estuvieron inversamente relacionados entre sí, y no mostraron correlación significativa ($P < 0,05$) con ninguno de los restantes parámetros de las ecuaciones (Tabla 1). Los valores originales de los parámetros se pueden observar en el trabajo anterior de esta serie de artículos (Mendoza, 1986).

Relación entre los parámetros de las ecuaciones de adsorción con el fósforo absorbido por "rye grass" y con el fósforo requerido para producir máximos rendimientos

El fósforo absorbido por las plantas de "rye grass" de los suelos sin fertilizar con fósforo, al cabo de los

35 (P_{35}) y 150 días (P_{150}) de crecimiento correlacionó inversamente con la cantidad de fósforo que fue necesario incorporar al suelo para obtener el 90% de la máxima producción de materia seca de los vástagos (P_{90}) (Tabla 2). Por otra parte, el fósforo absorbido por las plantas estuvo relacionado con el fósforo inicialmente disponible en el suelo estimado por el método de Bray 1 ($r = 0,67$ y $r = 0,75$, para P_{35} y P_{150} respectivamente). Consecuentemente, cuanto mayor fue la cantidad de fósforo disponible, mayor fue la cantidad absorbida por las plantas y menor la cantidad que se debió incorporar al suelo para lograr máximos rendimientos.

Los valores de a , $xm_1 + xm_2$, $1/B$ y S mostraron una correlación positiva con P_{90} (Tabla 2); por lo tanto, cuanto mayor fue la capacidad del suelo para adsorber fósforo, menor fue la cantidad disponible para el vegetal, y mayor la cantidad necesaria para satisfacer los requerimientos de la máxima producción.

Tabla 2: Matrices de correlación entre los parámetros de las ecuaciones de Freundlich, doble Langmuir y Gunary, el fósforo absorbido por "rye grass" y el fósforo requerido para producir máximos rendimientos.

Freundlich					
VARIABLES	P_{35}	P_{150}	P_{90}	a	
b	0,673	0,804	-0,648	-0,520	
P_{35}		0,959	-0,694	0,432	
P_{150}			-0,795	-0,565	
P_{90}				0,898	
doble Langmuir					
VARIABLES	$xm_1 + xm_2$	P_{35}	P_{150}	P_{90}	S
$k_1 + k_2$	0,282	-0,410	-0,435	0,290	0,474
$xm_1 + xm_2$		-0,391	-0,512	0,878	0,930
P_{35}			0,959	-0,694	-0,428
P_{150}				-0,795	-0,552
P_{90}					0,836
Gunary					
VARIABLES	P_{150}	P_{90}	1/B		
P_{35}	0,959	0,694	-0,482		
P_{150}		-0,795	-0,553		
P_{90}			0,789		

$P < 0,05$, $r = 0,632$; $P < 0,01$, $r = 0,765$; $P < 0,001$, $r = 0,872$

Sin embargo, de acuerdo con los resultados anteriores, P_{90} correlacionó negativamente con P_{35} y P_{150} , y positivamente con los parámetros de las ecuaciones (a , $x_{m1} + x_{m2}$, $1/B$ y S), por lo tanto se podría esperar una correlación significativa y negativa entre el fósforo absorbido por las plantas (P_{35} y P_{150}) y los valores de los parámetros de las ecuaciones. Sin embargo, ninguno de los parámetros asociados con la capacidad relativa de adsorción y con la capacidad reguladora correlacionó significativamente ($P > 0,05$) con P_{35} y P_{150} (Tabla 2). Aunque en la mayoría de los casos ($x_{m1} + x_{m2}$, $1/B$ y S) la tendencia correlativa fue negativa, esta no fue totalmente consistente puesto que en un caso (a) la correlación fue positiva (Tabla 2).

De los parámetros asociados con la afinidad entre el fósforo y el suelo solamente b estuvo relacionado significativamente con el fósforo absorbido por las plantas (P_{35} y P_{150}) (Tabla 2).

Relación entre la capacidad relativa de adsorción y capacidad reguladora de fosfato con algunas variables medidas en el suelo

De las cinco variables medidas en los suelos, sólo el A1 y el arc. mostraron correlación significativa ($P < 0,05$) con los coeficientes a y S (Tabla 3). Sin embargo, las variables del suelo podrían estar intercorrelacionadas (como en el caso de A1-Fe o MO-Fe), de manera tal que no existiera una directa relación causa-efecto entre a y S con las variables de suelo. A los efectos de seleccionar cuáles propiedades de los suelos contribuyen en mayor medida a la descripción de la

Tabla 3: Matriz de correlación entre los coeficientes a de la ecuación de Freundlich y S de la ecuación doble Langmuir con algunas variables medidas en los suelos estudiados.

Variables	Fe	arc	pH	MO	a	S
A1	0,702	0,899	-0,218	0,461	0,850	0,728
Fe		0,486	-0,535	0,708	0,539	0,416
arc			-0,031	0,463	0,738	0,633
pH				-0,237	-0,491	-0,527
MO					0,129	-0,019

$P < 0,05$, $r = 0,632$; $P < 0,01$, $r = 0,765$; $P < 0,001$, $r = 0,872$

Tabla 4: Regresión lineal múltiple del coeficiente a de la ecuación de Freundlich y algunas propiedades de los diez suelos estudiados. Contribución de las variables en la descripción de la variación del coeficiente a .

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	valor F	R ²
Totales	121104,05	9			
(1) A1	87426,88	1	87426,88	20,77**	0,72
residual	33677,17	8	4209,65		
(2) arc	65908,72	1	65908,72	9,55*	0,54
residual	55196,97	8	6899,62		
(3) A1 + arc	87856,93	2	43928,46	9,25*	0,73
residual	33247,12	7	4749,59		
vs A1	430,05	1	430,05	0,09 ns.	
vs arc	21949,85	1	21949,85	4,62 ns.	
(4) A1 + arc + Fe + pH + MO	116602,49	5	23320,50	20,72**	0,96
residual	4501,56	4	1125,39		
vs A1	29175,61	4	7293,90	6,48*	
vs arc	50695,41	4	12673,85	11,26*	
vs A1 + arc	28745,56	3	9581,85	8,51*	

(1) $a = 47,57 + 1328,53 A1$
 (2) $a = -77,52 + 4,24 arc$
 (3) $a = -36,61 + 1519,77 A1 - 0,78 arc$
 (4) $a = 317,79 + 1106,09 A1 + 1,76 arc - 84,03 Fe - 43,29 pH - 43,18 MO$
 Significancia de F: $P < 0,05 = *$; $P < 0,01 = **$; ns. = no significativo

variación en los valores de a y S se estudió la contribución de cada una de ellas a la variación total (Tablas 4 y 5).

El A1 describió el 72% de la variación del coeficiente a de la ecuación de Freundlich, mientras que arc sólo explicó el 54% de la variación de a (Tabla 4). La inclusión de ambas variables en la regresión no redujo significativamente ($P < 0,05$) la suma residual de cuadrados respecto de las regresiones obtenidas con A1 y con arc separadamente (Tabla 4). Sin embargo, la inclusión de todas las variables en la regresión redujo significativamente ($P < 0,05$) la suma residual de cuadrados, incrementando el valor de R^2 de 0,72 a 0,96 (Tabla 4).

En el caso del coeficiente S de la ecuación doble Langmuir, la situación resultó similar en parte a la observada en el caso del valor de a (Tabla 5). El A1 aportó el 53% de la variación de S , mientras que arc sólo explicó el 40% de la variación del mismo. Todas las variables aportaron el 93% de la variación de S . Sin embargo como en el caso de a , el mayor aporte a la

variación total de S estuvo a cargo de la variable A1 (Tabla 4 y 5).

DISCUSION

Los parámetros derivados a partir de las ecuaciones de adsorción que representan la capacidad relativa de adsorción y la capacidad reguladora de fosfato mostraron una alta correlación entre sí. Si bien los parámetros derivados a partir de la ecuación de Freundlich han sido criticados por no ofrecer un amplio significado físico-químico en comparación con los coeficientes de las ecuaciones de Langmuir y doble Langmuir (Holford, 1982); éste y otros trabajos han demostrado que existe una alta correlación entre los parámetros de aquella ecuación con los de estas últimas (Adamson, 1967; Mead, 1981; Holford, 1982). Consecuentemente la información suministrada por ambos grupos de parámetros (índice de la capacidad relativa de adsorción e índice de la capacidad reguladora

Tabla 5: Regresión lineal múltiple del coeficiente S de la ecuación doble Langmuir y algunas propiedades de los diez suelos estudiados. Contribución de las variables en la descripción de la variación del coeficiente S .

	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	valor F	R^2
Totales	2808940,51	9			
(1) A1	1488790,99	1	1488790,99	9,02*	0,53
residual	1320149,52	8	165018,69		
(2) arc	1126469,39	1	1126469,39	5,36*	0,40
residual	1682471,12	8	210308,89		
(3) A1 + arc	1495374,40	2	747687,20	3,98 ns.	0,53
residual	1313566,11	7	187652,30		
vs A1	6583,41	1	6583,41	0,04 ns.	
vs arc	368905,01	1	368905,01	1,97 ns.	
(4) A1 + arc + Fe + pH + MO	2615609,00	5	523121,80	10,82*	0,93
residual	193331,51	4	48332,88		
vs A1	1126817,01	4	281704,25	5,83 ns.	
vs arc	1489139,61	4	372284,90	7,70*	
vs A1 + arc	1120234,60	3	373411,53	7,73*	

(1) $S = -217,33 + 5482,35 A1$
 (2) $S = -342,27 + 17,52 arc$
 (3) $S = -172,41 + 6230,60 A1 - 3,06 arc$
 (4) $S = 2023,02 + 3723,94 A1 + 12,72 Fe - 261,44 pH - 281,76 MO$
 Significancia de F: $P < 0,05 = *$; ns. = no significativo.

de fosfato) resultaría suficiente para utilizarla en estudios comparativos entre suelos o grupos de suelos. Por otra parte, si definimos a la capacidad reguladora como la relación entre la cantidad de Pd por unidad de c, veremos que el valor del coeficiente a de la ecuación de Freundlich tiene unidades de capacidad reguladora (mL/g); de aquí que el valor de a haya sido utilizado tanto como índice de capacidad relativa de adsorción (Barrow, 1980) y también como índice de capacidad reguladora (Holford, 1982).

La relación inversa encontrada entre b y $k_1 + k_2$ es coincidente con estudios previos (Holford y Mattingly, 1976 b; Holford, 1982). Algunos autores han utilizado a la inversa del exponente de Freundlich (1/b) como factor afinidad más que el valor de b propiamente dicho (Mead, 1981).

La capacidad reguladora de fosfato es una de las propiedades del suelo que proporciona mayor información acerca de la dinámica del fósforo en el suelo, puesto que relaciona el fósforo adsorbido por el suelo (capacidad) con el fósforo en la solución (intensidad). La capacidad reguladora es función de la capacidad relativa de adsorción, por lo tanto ambas variables se encuentran correlacionadas (Tabla 1). A su vez, estas variables no correlacionaron con el fósforo absorbido por las plantas (Tabla 2) debido a que reflejan la capacidad del suelo para mantener una concentración constante de fósforo en la solución y no proporcionan idea acerca de la cantidad de fósforo realmente disponible para las plantas; por lo tanto, no existe razón alguna para esperar "a priori" una relación entre la capacidad relativa de adsorción y la capacidad reguladora con el fósforo absorbido por las plantas que, por otra parte, es función del fósforo realmente disponible.

La cantidad de fósforo que debe ser incorporada al suelo para alcanzar rendimientos cercanos a la máxima producción (P_{90}), puede ser interpretada como un factor de ineficiencia del suelo para suministrar fósforo disponible para la absorción de las plantas. Los suelos con altos valores de P_{90} se encuentran asociados con altos valores de capacidad reguladora y de capacidad relativa de adsorción, debido a que gran parte del fósforo incorporado es adsorbido por la fase sólida del suelo, lo que disminuye la cantidad disponible en la solución de la cual se nutre principalmente el vegetal.

El factor afinidad (1/b y $k_1 + k_2$) refleja una constante de equilibrio en la relación adsorción-desorción; un alto valor de este coeficiente indica que la relación

de equilibrio se encuentra desplazada hacia la fase sólida señalando que una alta proporción del fósforo agregado ha sido adsorbido por el suelo y, por ende, hay un efecto negativo del factor afinidad sobre el fósforo absorbido por las plantas del "pool" disponible.

La matriz de correlación indicó que la capacidad relativa de adsorción y la capacidad reguladora de fosfato del suelo aumentaron con el aluminio extractable (A1) y con el contenido de arcilla del suelo (arc) (Tabla 3); el resto de las variables de suelo no aportaron correlaciones significativas. Sin embargo, sólo el A1 resultó importante en la descripción de las variables a y S. La correlación entre la adsorción de fósforo en el suelo y los niveles extraídos tanto de aluminio como de hierro son dependientes del método utilizado para la extracción. En este trabajo la extracción ocupó principalmente a los óxidos amorfos de aluminio y hierro (Mc Keague y Day, 1966), por lo tanto, otros extractantes tales como el acetato de amonio (Yuan y Fiskell, 1959) el cual extrae principalmente la porción intercambiable, podrían arrojar otros resultados. No obstante, independientemente del método utilizado para la extracción, existen evidencias de que tanto la porción intercambiable como la porción amorfa de aluminio y hierro del suelo tienen influencia directa sobre la adsorción de fósforo en el suelo (Syers y Williams, 1977; Robange y Corey, 1979; Coleman *et al.*, 1960; Blowm, 1981; Bolan, 1983).

El empleo de los parámetros derivados de las ecuaciones de adsorción han demostrado proporcionar una valiosa información sobre las propiedades adsorptivas de fósforo del suelo. Estos índices podrían ser utilizados como estimadores de los requerimientos de las plantas con algunas ventajas respecto a los clásicos métodos de extracción de fósforo del suelo (Bray I, Olsen, etc), principalmente teniendo en cuenta que la capacidad reguladora relaciona los factores intensidad y capacidad que regulan la dinámica del fósforo en el suelo, mientras que los métodos extractivos sólo dan idea del "status" actual del fósforo en el suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. N. J. Barrow (CSIRO, Div. Animal Production, Western Australia) por sus sugerencias y por facilitarme sus programas de computación para la realización del trabajo.

Al Dr. Alberto Núñez por las determinaciones de aluminio y hierro extractable.

REFERENCIAS

- Adamson, A. W. 1967. Physical Chemistry of surfaces. Interscience. New York.
- Barrow, N. J. 1967. Effect of the soil's buffering capacity for phosphate on the relation between uptake of phosphorus extracted by sodium bicarbonate. *J. Aust. Int. Agric. Sci.* 33: 119-121.
- Barrow, N. J. 1975. The response to phosphate of two annual pasture species. I. Effect of soil's ability to adsorb phosphate on comparative phosphate requirement. *Aust. J. Agric. Res.* 26: 137-144.
- Barrow, N. J. 1980. Differences amongst a wide-ranging collection of soils in the rate of reaction with phosphate. *Aust. J. Soil Res.* 18: 215-224.
- Beckett, P. H. T. and R. E. White. 1964. Studies on the phosphate potentials of soils. III. The pool labile inorganic phosphate. *Pl. Soil* 21: 253-282.
- Bolan, N. S. 1983. Phosphate adsorption by soil constituents and its effect on plant response to both phosphorus application and micorrhizal infection. Thesis. M. Sc. (Ag). Dept. of Soil Sc. Pl. Nutr. Univ. of Western Australia. 198 pp.
- Bloom, P. R. 1981. Phosphorus adsorption by an aluminium-peat complex. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 45: 267-272.
- Coleman, N. T.; J. T. Thorup y W. A. Jackson. 1960. Phosphate sorption reactions that involve exchangeable aluminium. *Soil Sci.* 90: 1-7.
- Fitter, A. H. y C. D. Sutton. 1975. The use of the Freundlich isotherm for soil phosphate sorption data. *J. Soil Sci.* 26: 241-246.
- Fox, R. L. y E. J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soil. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 34: 902-907.
- Holford, I. C. R. 1979. Evaluation of soil buffering indices. *Aust. J. Soil Res.* 17: 495-504.
- Holford, I. C. R. 1982. The comparative significance and utility of the Freundlich and Langmuir parameters for characterizing sorption and plant availability of phosphate in soils. *Aust. J. Soil Res.* 20: 233-242.
- Holford, I. C. R. y G. E. G. Mattingly. 1976 a. A model for the behaviour of labile phosphate in soil. *Plant and Soil* 44: 219-229.
- Holford, I. C. R. y G. E. G. Mattingly. 1976 b. Phosphate adsorption and availability plant of phosphate. *Plant and Soil* 44: 377-389.
- Jackson, M. L. 1964. Análisis químico de suelos. Ed. Omega. Barcelona 662 pp.
- Mc Keague, J. A. y J. H. Day. 1966. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as acids in differentiating various classes of soils. *Can. J. Soil Sci.* 46: 13-22.
- Mead, J. A. 1981. A comparison of the Langmuir, Freundlich and Temkin equations to describe phosphate adsorption properties of soils. *Aust. J. Soil Res.* 19: 333-342.
- Mendoza, R. E. 1980. Adsorción de fósforo en el suelo y su relación con la producción de dos especies forrajeras. *Rev. Fac. Agron. UBA* 1 (2): 19-30.
- Mendoza, R. E. 1986. Isotermas de adsorción de fósforo en suelos argentinos: I Métodos de ajuste y comparación entre ecuaciones. *Ciencia del Suelo.* 4:107-116.
- Olsen, S. R. y F. S. Watanabe. 1957. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 21, 144-149.
- Ozanne, P. G. y T. C. Shaw. 1967. Phosphate sorption by soils as a measure of the phosphate requirement for pasture growth. *Aust. J. Agric. Res.* 18, 601-612.
- Robarge, W. P. y R. B. Corey. 1979. Adsorption of phosphate by hydroxy-aluminium species on a cation exchange resin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, 481-487.
- Russell, E. J. y Prescott, J. A. 1916. The reaction between dilute acids and the phosphorus compounds of the soil. *J. Agric. Sci.* 8: 65-110.
- Yuan, T. L. y J. G. A. Fiskell. 1959. Aluminium studies. II. Extraction of aluminium from some Florida soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23: 202-205.