

CONTRIBUCION AL ESTUDIO DEL FOSFORO EN SUELOS ACIDOS.
I. CARACTERISTICAS DE ADSORCION Y FRACCIONES DE P EN UNA
TIERRA PARDA DEL NOROESTE DE ESPAÑA.¹*/

J. ARINES**
Ma. TERESA ALVAREZ**

Abstract

P adsorption isotherm and P fractions were used to study the P adsorption characteristics of an acid brown soil from Galicia (North West of Spain). Adsorption data were adjusted to Freundlich, Langmuir, and Gurney equations, and to the parameter X/logC proposed by Bache and Williams

Results show that data adjusted well to the Freundlich equation for equilibrium concentration values between 1-12 ppm P. Between 0-12 ppm P, the adsorption is best described by the Gurney equation. It is suggested the operation of two mechanisms with maximum adsorption values of 226 and 463 ppm P.

Fractionation of soil P shows that adsorption occurs mainly as P-Al.

Introducción

La adsorción de P por el suelo se estudia generalmente por medio de su isoterma de adsorción, definida como la curva que relaciona la cantidad de sustancia adsorbida en una interfase, con su concentración en equilibrio en el medio en contacto con la misma.

Las ecuaciones que describen la adsorción se fundamentan en las de Freundlich y Langmuir, cuyas diferencias básicas son que la primera admite la variación de la energía de enlace con la cantidad adsorbida, y la última permite calcular un máximo de adsorción.

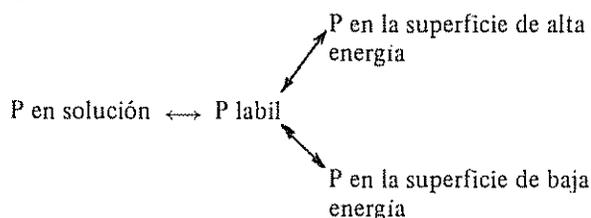
La capacidad de adsorción está muy relacionada con el contenido en arcilla y su naturaleza. Así, Olsen y Watanabe (14) obtienen una correlación significativa entre el máximo de adsorción y el área superficial del suelo aumentando aquél con el contenido en arcilla, y Fox *et al.* (6), encuentran en latosoles de Hawaii que el suelo que presenta mayor adsorción es aquél que contiene arcillas amorfas, en comparación con otros que contienen arcillas de tipo 1:1 ó 1:2.

Las modificaciones más interesantes de la ecuación de Langmuir se deben a dos autores. Gurney (7) introdujo un término adicional a la ecuación que le permitió un mejor ajuste de los datos experimentales, proporcionando también un máximo de adsorción. Teniendo en cuenta que la ecuación de Langmuir implica una energía de enlace constante y que los resultados experimentales sugieren al menos dos mecanismos de adsorción con energía de enlace diferente, Holford *et al.* (11) desarrollaron una ecuación de dos superficies o ecuación doble de Langmuir. El excelente ajuste obtenido sugiere que el fosfato se adsorbe sobre dos tipos de superficies de energía de enlace diferente. Con esta base, Holford y Mattingly (9) proponen el esquema de compartimiento siguiente:

1 Los autores agradecen al Dr D. Ramón Fábregas, Jefe de la U.E.I. de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal, la supervisión del manuscrito.

* Recibido para publicación el 11 de marzo de 1980.

** Instituto de Investigaciones Agrobiológicas de Galicia, del C.S.I.C. U.E.I. de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. Apartado 122. Santiago de Compostela. España.



Además de estas dos importantes modificaciones, Shayan y Davey (18) ensayan en 17 suelos la aplicación de una isoterma adimensional con buenos resultados; la principal ventaja de la misma parece ser el amplio número de concentraciones que puede describir.

Junto a estas ecuaciones que tienen por objeto establecer el comportamiento del P del suelo, parece conveniente citar un trabajo de Bache y Williams (1) en el que, tratando de obtener un índice que describa adecuadamente las características de adsorción de los suelos, comparan diferentes parámetros relacionados con las isotermas. Utilizando datos procedentes de las isotermas de 42 suelos escoceses, encuentran que el índice $X/\log C$ (siendo X el fosfato adsorbido y C la concentración en equilibrio) para una adición de $50 \mu\text{moles P/g}$ de suelo puede medir adecuadamente la isoterma de adsorción.

Diversos aspectos relacionados con la aplicación de las isotermas de adsorción son discutidos por Barrow (2) en un interesante estudio en el que, además, aporta datos de una investigación realizada en suelos australianos con el objeto de comparar distintas ecuaciones de adsorción. En este sentido, la conclusión es que para tales suelos se prefiere la isoterma de Freundlich.

Si bien las isotermas indican cómo varía la adsorción con la cantidad de P que se pone en contacto con el suelo, no proporcionan información acerca de la ubicación del P adsorbido en las distintas fracciones activas del suelo. Esta información se puede obtener aplicando la técnica de fraccionamiento preconizada por Chang y Jackson (3) modificada por diversos autores y discutida por Smith (20) especialmente en lo que se refiere a la fracción P-Al.

Con el objeto de conocer las propiedades de adsorción de suelos ácidos de Galicia, y su relación con la necesidad de fertilización fosfatada de los cultivos, hemos realizado los experimentos necesarios para lograr ambos objetivos utilizando una tierra parda y trébol violeta como sustrato y cultivo, respectivamente.

Material y métodos

Suelo utilizado

Se empleó la capa superficial (20 cm) de una tierra parda limosa sobre esquistos, localizada en una parcela muy fertilizada del Instituto de Investigaciones Agrobiológicas hasta el año 1973. La muestra se recogió en 1979. Sus características son:

pH en agua	5.86
pH en KCl 0,1N	5.32
M. O	5.97 g%
C/N	13.57

Textura: Franco-arenosa

Elementos extraídos con Morgan

P:	7.13 ppm
K:	78.75 ppm
Ca:	1 012.50 ppm
Mg:	32.56 ppm
Fe:	2.56 ppm
Al:	26.63 ppm
Mn:	2.50 ppm

El pH se determinó empleando una relación suelo: solución de 1:2.5 con un tiempo de incubación de 24 horas. Los elementos se extrajeron con solución Morgan a pH 4.8, determinándose el P, Al, Fe, Mn y Mg según Schuffelen (17), y el Ca y K por fotometría de llama con adición de AEDT. El carbono orgánico por el método de Leal y Fábregas (13), en el N por Kjeldhal.

Isoterma de adsorción

Se siguió el procedimiento descrito por Fox y Kamprath (5) incrementando el tiempo de incubación hasta en 8 días. Las cantidades de fosfato (H_2KPO_4) añadidas, en solución, fueron de 0, 12, 5, 25, 50, 100, 200, 250, 350 y 500 ppm P, haciéndose 4 repeticiones de cada tratamiento. El P se determinó en el sobrenadante con molibdato amónico y cloruro estannoso, siendo las condiciones de la solución de medida las siguientes: concentración de molibdato, 0.1N; concentración de Sn, 0.0024 por ciento; y acidez 0.4N, aproximadamente. Conociendo la cantidad añadida de P y su concentración en el sobrenadante, se determina el P adsorbido.

Los valores obtenidos con las distintas adiciones de P, se corrigieron restándole los encontrados con el tratamiento PO (control) al objeto de reflejar únicamente el efecto del P que se adicionó.

Fraccionamiento

Las muestras para el fraccionamiento se obtuvieron después de incubar en cristalizadores de vidrio 400 g de suelo con 0, 44.44, 88.88, y 133.32 ppm P (aplicado en solución acuosa), equivalentes a 0, 100, 200 y 300 kg de P/ha. Cada adición se repitió 3 veces. A los 38 días se tomaron muestras, se secaron al aire, y de ellas se tomó 1 g para el fraccionamiento. Este se realizó en tubos de centrifuga con la fracción menor de 2 mm de suelo, según el procedimiento siguiente:

Isoterma de Freundlich

La isoterma se representa en una forma lineal en la Figura 2A. Como puede observarse, los puntos experimentales sólo se ajustan a la ecuación de la recta para valores de concentración superiores a 28.87 μM ó 1.025 ppm. Por regresión lineal se ha obtenido la ecuación:

$$\log X = 0.083 + 0.393 \log C; r = 0.996; s_{yx} = 0.0146$$

Fraccionamiento

Fracción	Extractor	Tiempo de agitación	Lavado del residuo
P-soluble	50 ml de NH_4Cl 1N	1 hora	25 ml de sol. sat. ClNa
P-Al	50 ml de NH_4F 0.5N a pH 8 (x)	1 hora	25 ml de sol. sat. ClNa
P-Fe	50 ml de NaOH 0.1N	17 horas	25 ml de sol. sat. ClNa
P-soluble en reductor (xx)	25 ml de $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.3 M + $\text{S}_2\text{O}_4\text{Na}_2$ (1 g)	8 minutos al baño María	25 ml de sol. sat. ClNa
P-Ca	50 ml de H_2SO_4 0.5N	1 hora	agua destilada
P-orgánico residual	Calcinación a 550°C y extracción con HCl 1N (50 ml)	1 hora	

(x): según Uriyo y Kesseba (23)

(xx): para la determinación del P en esta fracción se juntan el extracto y la solución de lavado

Para la determinación del P en los extractos, la interferencia del ión F^- en la fracción P-Al se eliminó con ácido bórico 0.8M (12), la interferencia de la materia orgánica en la fracción P-Fe con gotas de ácido sulfúrico concentrado (16) ajustando el pH con p-nitrofenol como indicador antes de la adición de los reactivos, y las interferencias de ditionito y citrato en la fracción P-soluble en reductor por burbujeo de aire y solución acuosa de molibdato al 5 por ciento (24). El color azul se desarrolló con molibdato y cloruro estannoso, leyéndose las absorbancias a 608 nm.

El análisis estadístico de los resultados se hizo siguiendo los métodos publicados por Snedecor y Cochran (21).

Resultados

En la Figura 1 se representan los valores medios modificados del P adsorbido ($\mu\text{moles P/g}$ suelo) frente a la concentración de P en la solución en equilibrio (μM). De ella se han calculado los valores de la capacidad tampón (CT) como las pendientes de las tangentes a la curva en los puntos elegidos.

en la que tanto la pendiente de la recta como el coeficiente de correlación son significativos al nivel del 1%.

Isoterma de Langmuir

Se representa en la Figura 2B, omitiendo los 4 primeros puntos experimentales (de un total de 9) por presentar una distribución anárquica. El ajuste de los cinco últimos (los mismos que en la ecuación de Freundlich) proporcionan la siguiente ecuación:

$$C/X = 5.64 + 0.067 C; r = 0.989; s_{yx} = 1.1416$$

en la que son significativos al 1% la pendiente de la recta y el coeficiente de correlación, y al 5% el término independiente.

A partir de la ecuación se han calculado el máximo de adsorción (X_m) y la energía de enlace (a) resultando:

$$X_m = 462.67 \mu\text{g P/g suelo}; a = 11.88 \cdot 10^{-3} \mu\text{M}^{-1}$$

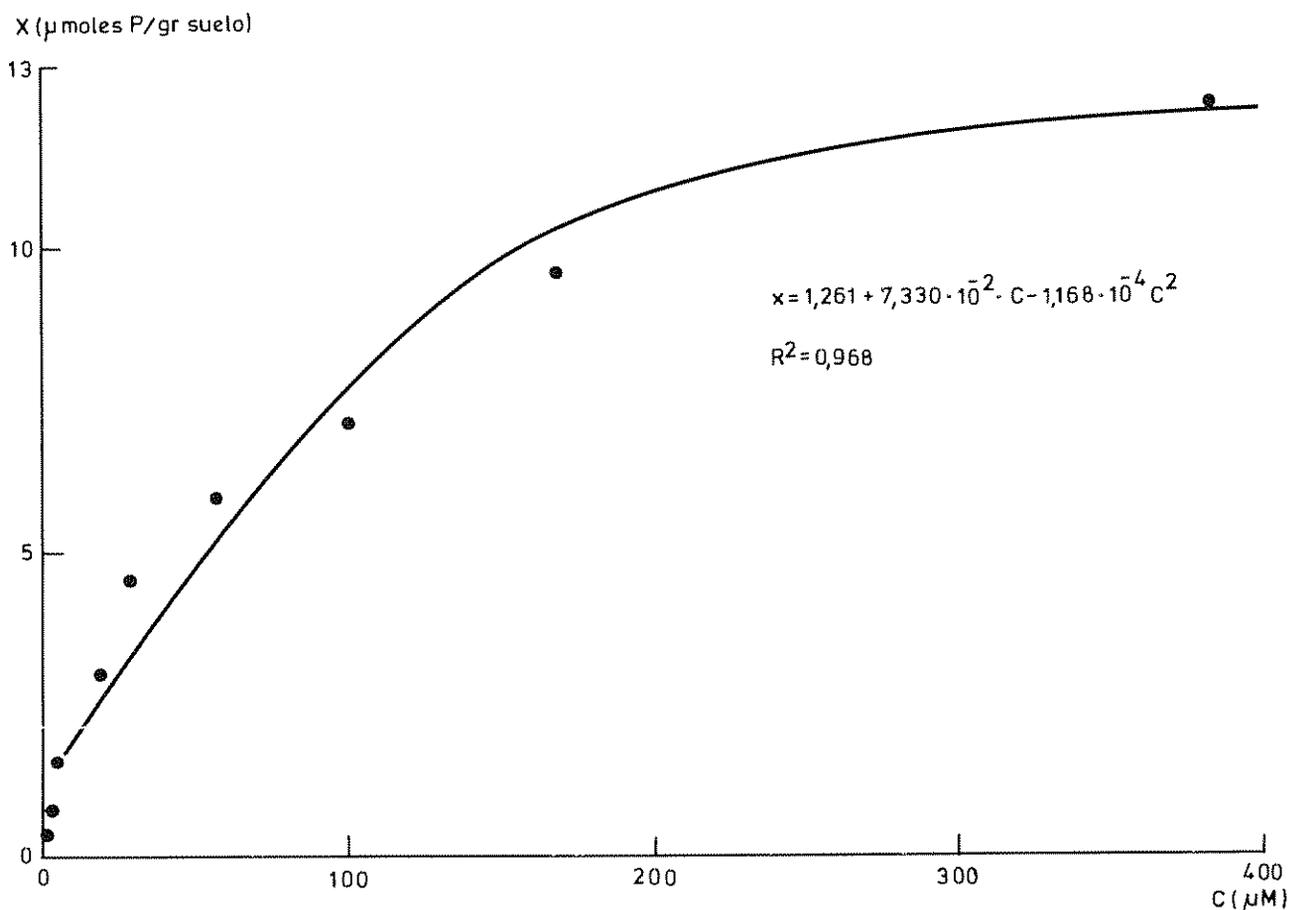


Fig. 1 Isoterma de adsorción X = P adsorbido en μ moles de P/g suelo.
 C = Concentración de P (μ M) en el equilibrio.
 ● = Puntos experimentales.

Isoterma de Gunary

Por regresión múltiple de todos los puntos experimentales ($n = 9$) se ha obtenido la ecuación:

$$C/X = 0.87 + 0.045 \cdot C + 0.572 \cdot C^{1/2}; R^2 = 0.992$$

en la que el coeficiente "C" es significativo al 1% y el de " $C^{1/2}$ " al 5%.

Transformando la ecuación en la forma:

$$1/X = B + A/C + D/C^{1/2}$$

se obtiene el máximo de adsorción dado por:

$$\text{Máx. de adsorción} = 1/B = 688.82 \mu\text{g P/g suelo}$$

La regresión lineal de los valores estimados de C/X [$(C/X)_e$ en la figura] a partir de la ecuación múltiple frente a C, permite obtener la ecuación de la recta que se representa en la Figura 2C.

$$(C/X)_e = 2.734 + 0.072 \cdot C; r = 0.994; s_{yX} = 1.0095$$

en la que todos los coeficientes son significativos al 1%.

Parámetro de Bache y Williams

El parámetro $X/\log C$ propuesto por Bache y Williams presenta un crecimiento continuo con la adición de P en el intervalo estudiado (concentraciones en superficie de 0 a 13 μ moles P/g suelo). Tal comportamiento nos ha llevado a estudiar su regresión lineal frente a "C" con el resultado siguiente:

$$X/\log C = 2.337 + 7.7 \cdot 10^{-3} \cdot C; r = 0.839; s_{yX} = 0.6656$$

en la que todos los coeficientes son significativos al 1%.

La recta de regresión se representa en la Figura 2D.

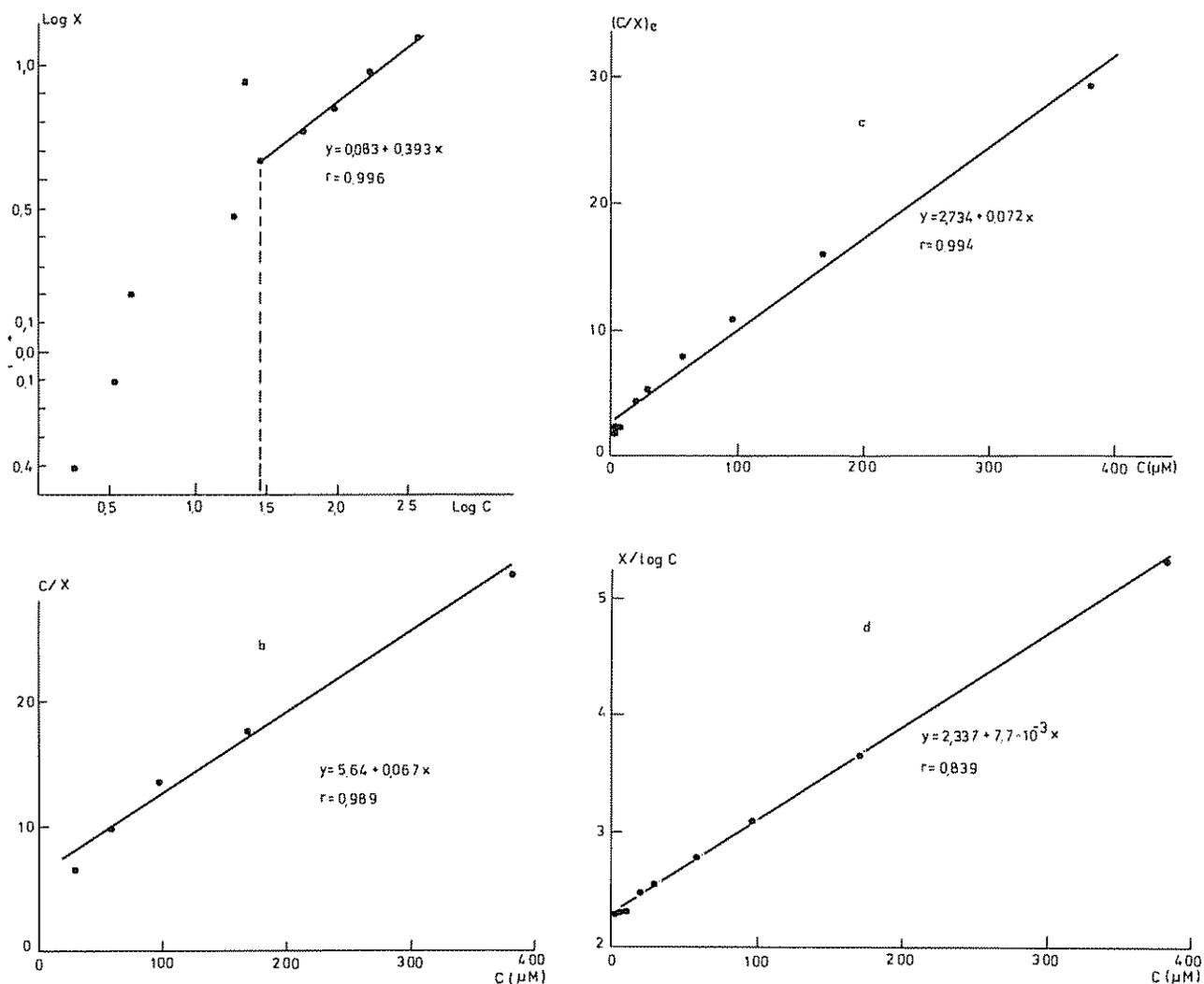


Fig 2 a) Isotherma de Freundlich. b) Isotherma de Langmuir. c) Isotherma de Gurney. d) Variación del parámetro de Bache y Williams. X, C y ●: ver Fig. 1. $(C/X)_e$ = Valores estimados de C/X a partir de la ecuación con término de raíz cuadrada de Gurney

Capacidad tampón

La variación de la CT frente a la concentración de P en equilibrio se representa en la Figura 3.

Porcentaje de P adsorbido

En la Figura 4 se representa la variación del P adsorbido con el P añadido. La ecuación de la línea de regresión, en la que todos los coeficientes son significativos al 1%, es:

$$\%P \text{ adsorbido} = 98.15 - 0.04 \cdot P \text{ añadido (ppm)}; \\ r = 0.977$$

Fraccionamiento del P adsorbido

El valor medio de la cantidad de P extraída en cada fracción se presenta en el Cuadro 1. En el Cuadro

2, se indica el resultado del análisis de varianza de las fracciones.

Las cantidades totales de P extraídas en los tratamientos PO, P100, P200 y P300, fueron de 359.29, 403.00, 432.63 y 473.61, respectivamente.

En el Cuadro 3 se presenta la distribución porcentual por fracciones del P recuperado en cada uno de los tratamientos.

Discusión

La representación del P adsorbido frente a la concentración del mismo en la solución en equilibrio (Figura 1) nos muestra una isoterma en la que

Cuadro 1. Valores medios de la cantidad de P extraído en cada fracción en ppm.

Fracción	Tratamientos			
	PO	P100	P200	P300
P-soluble	2.54 (0.08)	3.88 (0.00)	7.60 (1.37)	8.20 (0.87)
P-Al	188.22 (13.60)	207.67 (10.70)	234.73 (16.84)	255.56 (2.41)
P-Fe	87.22 (10.75)	100.84 (18.05)	98.34 (13.77)	113.34 (0.00)
P-soluble en reductor	35.20 (4.46)	38.44 (4.24)	39.83 (7.65)	40.29 (2.78)
P-Ca	33.06 (2.78)	32.50 (1.44)	31.67 (1.66)	35.55 (3.85)
P-orgánico residual	17.06 (0.67)	19.67 (1.70)	20.67 (0.60)	20.67 (0.60)
% P recuperado	—	98.36	82.74	85.75

() = error estándar de la media.

Cuadro 2. Análisis de varianza de las fracciones de P.

Concepto	P-soluble	P-Al	P-Fe	P-soluble en reductor	P-Ca	P-orgánico residual
Valor "F" para tratamientos	26.17xx	13.04xx	2.44	0.11	1.71	2.01
DMS al 5%(ppm)	1.44	20.69	—	—	—	—

xx = significativo al nivel del 1%

DMS = diferencia mínima significativa entre tratamientos.

Cuadro 3. Distribución porcentual del P recuperado.

Fracción	Tratamientos		
	P100	P200	P300
P-soluble	3.02	5.69	4.24
P-Al	43.77	52.32	50.51
P-Fe	30.64	12.51	19.59
P-sol en red	16.30	9.71	6.82
P-Ca	1.24	1.56	1.87
P-org residual	5.88	4.06	2.71

la cantidad adsorbida disminuye al aumentar la saturación total con las adiciones de fosfato empleadas.

La aplicación de las isothermas de Freundlich y Langmuir al suelo objeto de estudio, revela que éste no se ajusta totalmente a ninguna de ellas para valores de concentración en solución inferiores a 1 ppm P. Para valores superiores, la adsorción es significativamente representada por ambas isothermas, siendo superior el ajuste a la de Freundlich como se demuestra comparando tanto los coeficientes de correlación como las desviaciones típicas de las regresiones. También en concentraciones inferiores a 1 ppm los datos se ajustarían mejor a la isoterma de

Freundlich; mientras que en ésta los puntos se distribuyen en una forma ordenada, curvilínea, en la de Langmuir su distribución es anárquica. La isoterma de Freundlich, con un punto de ruptura curvilínea-lineal a una concentración en solución próxima a 1 ppm, sugiere dos mecanismos de adsorción de propiedades diferentes.

El ajuste de los puntos experimentales a la ecuación de Gunary presenta un coeficiente de determinación de 0.992, lo que permite decir que dicho modelo representa adecuadamente las propiedades del suelo con respecto al fósforo en todo el rango de adiciones de fosfato. Es de señalar, además que mientras la ecuación de Langmuir proporciona un máximo de adsorción de 462.67 ppm, la ecuación modificada por Gunary permite calcular un máximo

de 688.82 ppm. Es posible que la diferencia sea debida a adsorción en el rango de concentraciones en soluciones inferiores a 1 ppm. Se puede postular entonces la operatividad de dos mecanismos: uno a baja concentración con un máximo de adsorción de 226.15 ppm, de alta energía de enlace y baja disponibilidad de P, y otro operativo a concentraciones superiores con un máximo de adsorción de 462.67 ppm, con baja energía de enlace y elevada disponibilidad del P adsorbido.

La capacidad tampón disminuye con la adición de fosfato al suelo, y su importancia ha sido discutida, entre otros, por Ozanne y Shaw (15), Holford y Mattingly (10) y Holford (8). Por lo tanto, con respecto a nuestros resultados sólo indicaremos que (Figura 3) se puede establecer un punto crítico (fle-

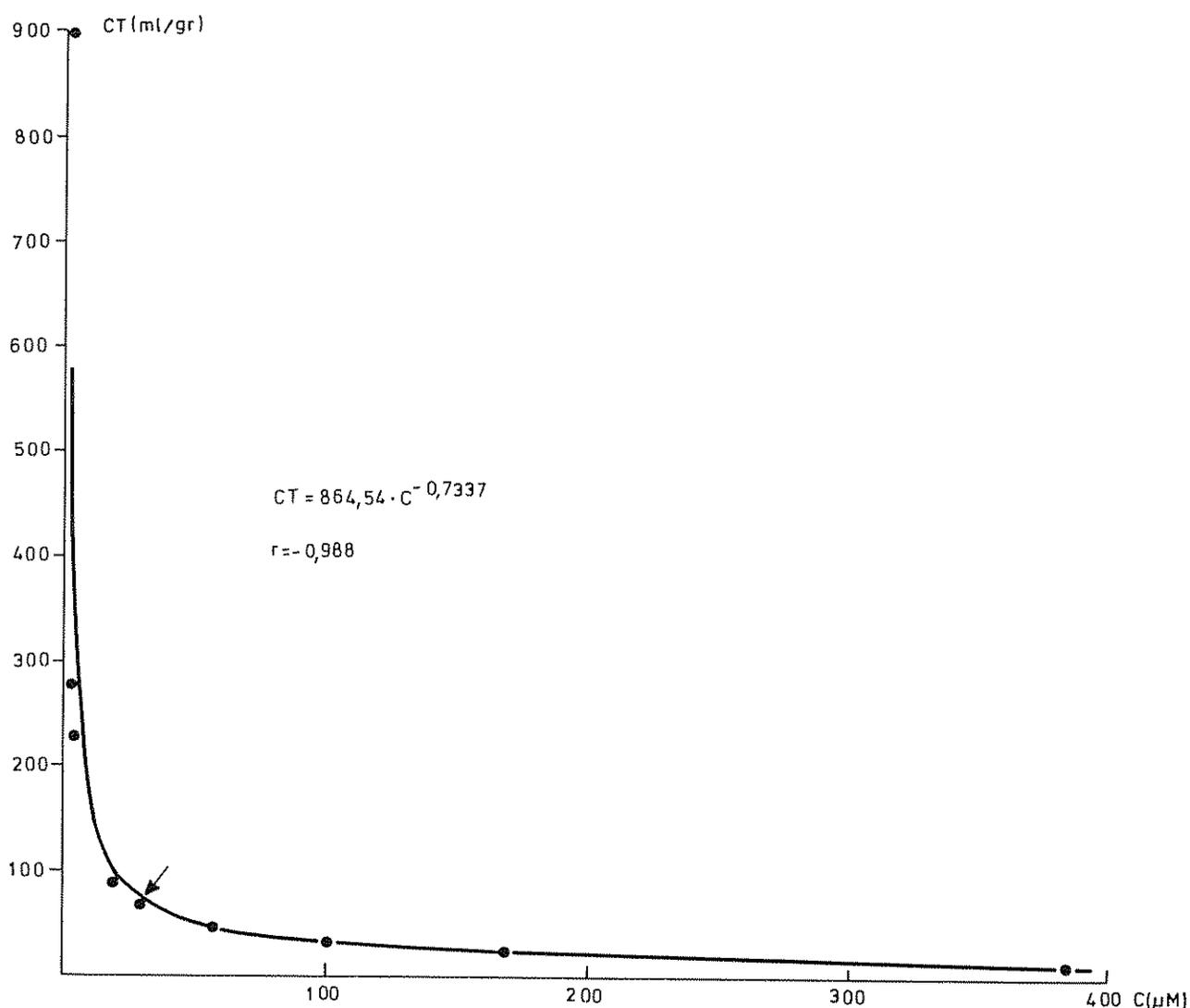


Fig. 3 Variación de la capacidad tampón (CT, en ml/g) con la concentración de P(µM) en la solución.

cha en la Figura 3) a partir del cual no existiría limitación a la disponibilidad de P en la planta, que correspondería a una CT del orden de 80 ml/g o una concentración en la solución próxima a 1 ppm P.

La Figura 4 pone de manifiesto que el por ciento de P adsorbido disminuye progresivamente, de forma que puede ser lineal, con la cantidad de P añadido. Es pues imprescindible cuando se den datos de adsorción el indicar la cantidad de fosfato adicionado.

El estudio de las distintas fracciones de P pone de relieve que en su estado natural el fósforo se encuentra ligado preferentemente al aluminio y al hierro, correspondiendo a la fracción P-Al un 52 por ciento y a la P-Fe un 24 por ciento, del total. El análisis estadístico del efecto de los tratamientos, para cada fracción, indica que sólo son significativos los que se

refieren al P extraído con NH_4Cl y con NH_4F , es decir, a las fracciones P-soluble y P-Al, lo que sugiere que las variaciones habidas en el resto de las fracciones están dentro de los límites del error experimental. Esta sugerencia viene apoyada por el hecho de que para el periodo de incubación utilizado no deben esperarse cambios en las fracciones menos reactivas, de acuerdo con resultados obtenidos por Shelton y Coleman (19) quienes después de fertilizar no encuentran P soluble en el reductor ni ocluido en forma consistente hasta los 3 años de la aplicación, y en el periodo inicial la mayor parte del P añadido se encuentra en la fracción P-Al.

El aumento del P-soluble y del P-Al es especialmente importante para las plantas, el del primero por razones obvias y el del segundo porque el P-Al es de 1.11 a 2.8 veces más activo que el P-Fe (22) y por

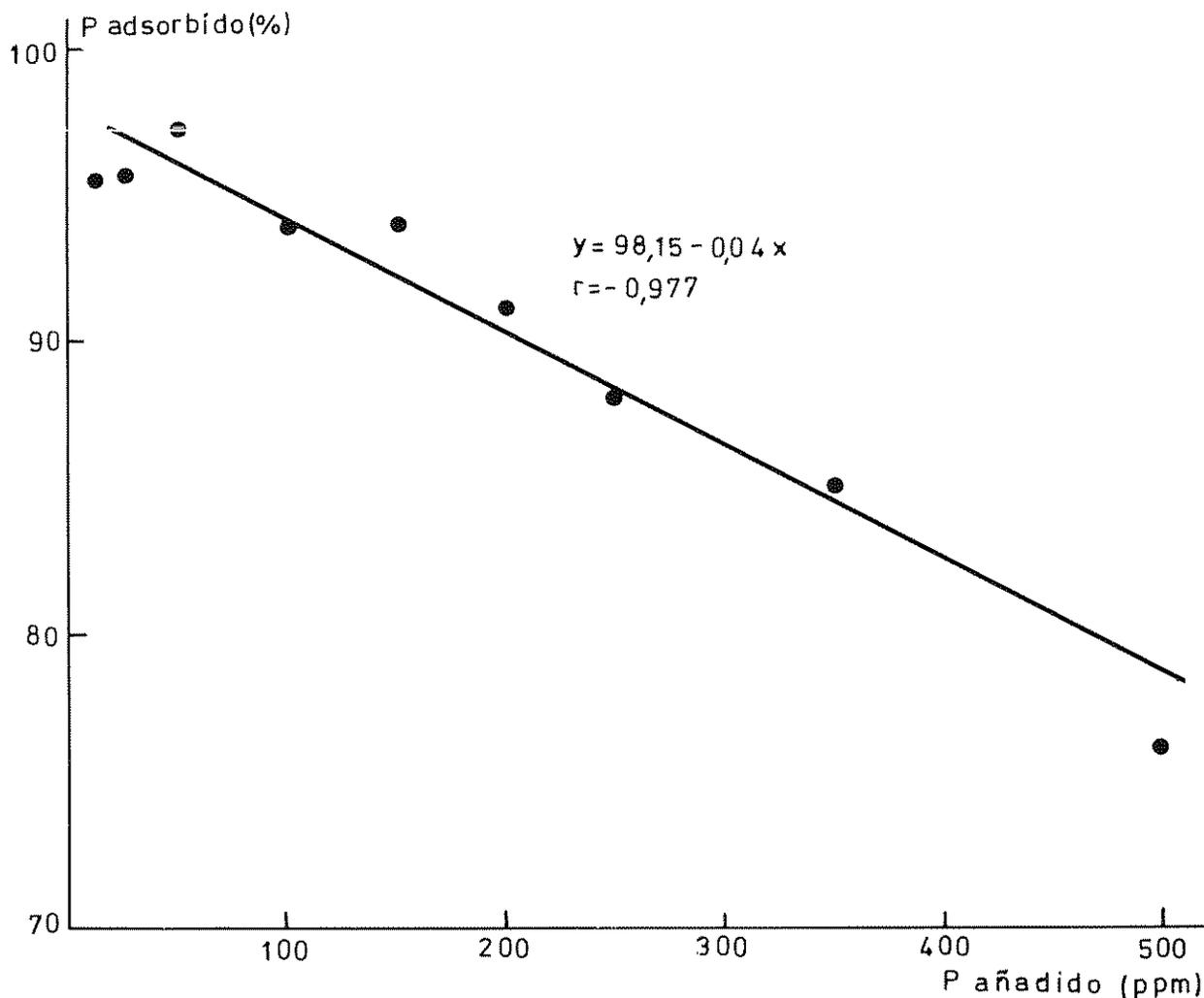


Fig 4. Variación del P adsorbido con el P añadido.

existir una buena correlación entre el P-Al y el P extraído con HCl 0.05N + H₂SO₄ 0.025N (19), representativo en muchos casos del P asimilable.

El porcentaje de recuperación del fosfato no sigue una tendencia que se pueda relacionar con la cantidad añadida, observándose que es apreciablemente superior la obtenida con el tratamiento P100. Esta falta de relación también se observa en resultados obtenidos por Yuan *et al* (25).

Aunque ya hemos señalado que no existen diferencias significativas entre tratamientos en los resultados de la fracción P-Ca, llama la atención el hecho de encontrar valores negativos, con respecto al control, con los tratamientos P100 y P200. Un resultado similar, cualitativamente, es obtenido por Fassbender (4) en muestras de suelos de profundidad superior a 7.5 cm, justificando tal resultado mediante una transformación del fosfato cálcico nativo. El balance positivo encontrado con el tratamiento P300 puede ser debido a la presencia de un exceso de fosfato que desplaza el equilibrio en el sentido de la adsorción.

Resumen

Fueron estudiadas las características de adsorción de P de una tierra parda del noroeste de España, mediante la determinación de su isoterma de adsorción y las fracciones del P adsorbido. Los datos de adsorción se ajustaron a las ecuaciones de Freundlich, Langmuir y Gunary, y se estudió la variación del parámetro X/logC propuesto por Bache y Williams.

Los resultados indican que para valores de concentración en solución superiores a 1 ppm de P, los datos se ajustan bien a la isoterma de Freundlich. En toda la gama de concentraciones, la ecuación que mejor representa el comportamiento del P es la de Gunary. Se sugiere la existencia de dos mecanismos de adsorción con máximos a 226 y 462 ppm.

El fraccionamiento revela que la adsorción ocurre preferentemente como P-Al.

Literatura citada

1. BACHE, B. W. and WILLIAMS, E. G. A phosphate sorption index for soils. *Journal of Soil Science*, 22:289-301. 1971.
2. BARROW, N. J. The description of phosphate adsorption curves. *Journal of Soil Science*, 29:447-462. 1978.
3. CHANG, S. C. and JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science*, 84:133-144. 1957.
4. FASSBENDER, H. W. Forms of phosphate after nine years of superphosphate fertilization of cacao. *Agrochimica*, 13:39-43. 1969.
5. FOX, R. L. and KAMPRATH, E. J. Phosphate sorption isotherm for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34:902-907. 1970.
6. FOX, R. L.; PLUCKNETT, D. L. and WHITNEY, A. S. Phosphate requirements of Hawaiian latosols and residual effects of fertilizer phosphorus. *Transactions of the 9th International Congress of Soil Science, Adelaide, Australia, Vol. 2:301-310. 1968.*
7. GUNARY, D. A. new adsorption isotherm for phosphate in soils. *Journal of Soil Science*, 21:72-77. 1970.
8. HOLFORD, I. R. C. Effects of phosphate buffer capacity of soil on the phosphate requirements of plants. *Plant and Soil*, 45:433-444. 1976.
9. HOLFORD, I. R. C. and MATTINGLY, G. E. G. A model for the behaviour of labile phosphate in soil. *Plant and Soil*, 44:219-229. 1976.
10. HOLFORD, I. R. C. and MATTINGLY, G. E. G. Phosphate adsorption and availability plant of phosphate. *Plant and Soil*, 44:377-389. 1976.
11. HOLFORD, I. R. C. WEDDERBURN, R. W. M. and MATTINGLY, G. E. G. A Langmuir two-surface equation as a model for phosphate adsorption by soils. *Journal of Soil Science*, 25:242-255. 1974.
12. JACKSON, M. L. *Soil Chemical Analysis*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 1958. 498 p.
13. LEAL, A. y FABREGAS, R. Determinación de carbono orgánico en suelos. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 29:245-252. 1970.
14. OLSEN, S. R. and WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the

- Langmuir isotherm. Soil Science Society of America Proceedings, 21:144-148. 1957.
15. OZANNE, P. G. and SHAW, T. C. Advantages of the recently developed phosphate sorption test over older extractant methods for soil phosphate. Transactions of the 9th International Congress of Soil Science, Adelaide, Australia, Vol. 2:273-280. 1968.
 16. PETERSEN, G. W. and COREY, R. B. A modified Chang and Jackson procedure for routine fractionation of inorganic soil phosphorus. Soil Science Society of America Proceedings, 30:563-565. 1966.
 17. SCHUFFELEN, A. C.; MULLER, A. and VAN SCHOUWENBURG, J. Ch. Quicktests for soil and plant analysis used by small laboratories. Netherland Journal of Agricultural Science, 9:2-16. 1961.
 18. SHAYAN, A. and DAVEY, B. G. A universal dimension-less phosphate adsorption isotherm for soil. Soil Science Society of America Journal, 42:878-882. 1978.
 19. SHELTON, J. E. and COLEMAN, N. T. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. Soil Science Society of America Proceedings, 32:91-94. 1968.
 20. SMITH, A. N. Fractionation of inorganic phosphorus in soils. The Chang and Jackson Fractionation procedure: its limitation and uses. Agricultural Digest, No. 17:10-19. 1969.
 21. SNEDECOR, G. W. y COCHRAN, W. G. Métodos estadísticos aplicados a experimentos en agricultura y biología. 5a. Edición CECSA, México. 1970. 626 p.
 22. TANDON, H. L. S. and KURTZ, L. T. Isotopic exchange characteristics of aluminium- and iron-bound fractions of soil phosphorus. Soil Science Society of America Proceedings, 32:799-802. 1968.
 23. URIYO, A. P. and KESSEBA, A. An evaluation of NH_4F as a selective extractant for aluminium phosphate in two soils of the tropics. Geoderma, 8:207-220. 1972.
 24. WEAVER, R. M. A simplified determination of reductant-soluble phosphate in soil phosphate fractionation schemes. Soil Science Society of America Proceedings, 38:153-154. 1974.
 25. YUAN, T. L.; ROBERTSON, W. K. and NELLER, J. R. Forms of newly fixed phosphorus in three acid sandy soils. Soil Science Society of America Proceedings, 24:447-450. 1960.