

Encalado y Retención de Fósforo en Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas¹

J. Alvarado*, L.J. Cajuste**

ABSTRACT

The effect of phosphorus and lime application on the extractability and retention of phosphorus was studied in soils derived from volcanic ash in Tancitaro, Michoacan, Mex. Extractable P was evaluated and the b (maximum adsorption capacity) and k (constant related to bonding energy) parameters of the Langmuir isotherm were determined. There was not a significant effect of the application of lime and phosphorus on P extractability and parameter b, although a slight reduction of phosphorus adsorption was observed in some soils. Bonding energy decreased with liming and phosphorus application.

Palabras clave: Cal, fósforo disponible, andosoles, suelos ácidos, capacidad máxima de adsorción.

RESUMEN

Se estudió en laboratorio el efecto de la aplicación de cal y P sobre la retención y extracción de este último en suelos derivados de cenizas volcánicas en Tancitaro, Michoacán, Méx. Se evaluó el P extractable y se estimaron los parámetros b (capacidad máxima de adsorción) y k (constante relacionada con la energía de enlace) de la isoterma de Langmuir. El efecto de la aplicación de cal y P sobre la extracción de P y el parámetro b no fue significativo, aunque se observó una ligera reducción de la adsorción de P en algunos suelos. La energía de enlace disminuyó con el encalado y la aplicación de fósforo.

INTRODUCCIÓN

La alta capacidad de retención y la baja disponibilidad de P son los principales problemas que se presentan en los suelos derivados de cenizas volcánicas.

La retención de P involucra mecanismos más complejos que la simple atracción electrostática. Uno de dichos mecanismos se conoce como intercambio de "ligandos" y consiste en el intercambio de iones fosfato con iones hidroxilo en los bordes de los hidróxidos de Al y Fe (Parfitt 1978; White 1980). Las reacciones de intercambio de "ligandos" implican competencia entre los diferentes aniones en el suelo (aniones orgánicos, bicarbonato, nitrato, silicato, sulfato, fosfato e hidroxilo) por los sitios de ad-

sorción. Aun cuando el fosfato es adsorbido fuertemente en la mayoría de los suelos, puede verse desplazado parcialmente por los aniones AsO_4^{3-} , ScO_3^{2-} , HCO_3^- , OH^- y algunos aniones orgánicos (Bowden *et al.* 1980; White 1980).

En la región productora de aguacate de Tancitaro, Michoacán, los suelos presentan una alta capacidad de retención de P, en gran parte de origen volcánico, que se refleja en la baja disponibilidad de este nutriente. En la zona, la aplicación de cal es una práctica común; sin embargo no se cuenta con trabajos sobre el efecto del encalado. Análisis de suelos de esa zona muestran que el contenido de P es mayor en aquellos donde se aplicó cal. Ante esta situación, el objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de la aplicación de cal y P en la retención y extracción del nutriente P en los suelos de Tancitaro, Michoacán.

La aplicación de cal es considerada por algunos investigadores como una alternativa para contrarrestar el problema de retención de P (López-Hernández y Burnham 1974; Okajima 1977; Smyth y Sánchez

¹ Recibido para publicar el 1 de junio de 1993

* Investigador Docente; Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx

** Profesor Investigador Titular; Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx

1980; Woodruff y Kamprath 1965). Sin embargo, Amarasiri y Olsen (1973), Mokwunye (1975), Murrman y Peech (1969), Robarge y Corey (1979) señalan que el encalado incrementa la retención de fósforo. Otros autores mencionan que ambos fenómenos ocurren, aunque en suelos diferentes (Holford 1983; Le Mare y León 1989) o incluso en un mismo suelo con diferentes niveles de cal (López-Hernández y Burnham 1974; Sims y Ellis 1983; White y Taylor 1977). Barrow (1987) indica que las diferencias relacionadas con el efecto del encalado en la retención de P son el resultado después de trabajar con suelos de distinta naturaleza, con diferentes niveles de cal (se pueden tener efectos opuestos al encalar de pH 4.5 a 5.5 y de pH 5.5 a 7.0) y con soluciones electro-líticas de diversa composición para medir la adsorción.

En México, el efecto del encalado en la retención del P ha sido poco estudiado. Miramontes y Ortega (1972) señalan que la aplicación de CaCO_3 y/o CaSiO_3 aumentó la capacidad de retención de P en suelos de la Chontalpa, en Tabasco, y de Chapingo, mientras que la redujo en uno de Camébaro, Michoacán.

Alvarado (1990) estudió el efecto del encalado en la retención de P en cinco suelos medianamente fijadores de ese nutriente en el estado de México; los resultados mostraron que el encalado incrementó la capacidad máxima de adsorción del elemento en la mayoría de los suelos estudiados.

Cajuste *et al.* (1987) mencionan que la aplicación de cal en suelos oxisoles produjo una disminución en la capacidad de retención de P, evaluada a través de la isoterma de Langmuir.

El Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) realizó un estudio sobre el efecto del encalado (Laird 1984), junto con la aplicación de gallinaza y P en el rendimiento de maíz en suelos de la Sierra Tarasca (altamente fijadores de P). Sus resultados mostraron que el encalado incrementó el rendimiento del maíz en todos los sitios de prueba. Sin embargo, la interacción entre P y cal fue negativa, lo cual pudo deberse a un incremento en la retención del P aplicado, causado por el encalado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se efectuó con siete suelos (andosoles) de Tancitaro, con alta capacidad de reten-

ción de fósforo. Los suelos 1, 2, 3 y 4 proceden de un muestreo en la localidad de Zirimbo, ubicada en las coordenadas 19°18' latitud norte y 102°19' longitud oeste, con una altitud de 1950 msnm, y los suelos 5, 6 y 7 son de la localidad El Cuate, situada en las coordenadas 19°14' latitud norte y 102°18' longitud oeste, con una altitud de 1700 msnm; ambas localidades pertenecientes al municipio de Tancitaro. Los suelos de Zirimbo se clasifican como andosoles húmicos y los de El Cuate como andosoles ócricos, según la Coordinación General de los Servicios Nacionales de Estadística, Geografía e Informática (1983a; 1983b). El muestreo de suelos se realizó a una profundidad de 0 cm a 30 centímetros. Las muestras se secaron a la sombra y a temperatura ambiente; después fueron pasadas por un tamiz malla 10 (aberturas de 2 mm). Los suelos se caracterizaron de acuerdo con el pH en agua, relación suelo-agua 1:2 (Jackson 1976); materia orgánica (Jackson 1976); contenido de arcilla (Kalra y Maynard 1991); densidad aparente (Kalra y Maynard 1991); P extractable Bray 1 (Jackson 1976); capacidad de retención de P (Alvarez 1982) y Ca, Mg, K y Na intercambiables (Jackson 1976).

Se estableció un experimento factorial con dos factores y tres niveles cada uno; cal (0 mg, 150 mg y 300 mg de CaCO_3 por 100 g de suelo) y, por duplicado, P (0 mg, 200 mg y 400 mg por kilogramo) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Conjunto factorial de los tratamientos aplicados.

Tratamiento	(mg CaCO_3 . 100 g ⁻¹ de suelo)	P (mg . kg ⁻¹)
1	0	0
2	0	200
3	0	400
4	150	0
5	150	200
6	150	400
7	300	0
8	300	200
9	300	400

La cal y el fósforo se aplicaron en diferentes tiempos. Los suelos fueron encalados y posteriormente incubados a capacidad de campo y temperatura ambiente, durante 45 días. Al término de la incubación, fueron secados. Entonces se aplicó el P en solución, en la cantidad de agua necesaria para mantenerlos a

capacidad de campo y se incubaron durante 15 días. Posteriormente se secaron a temperatura ambiente. En los suelos incubados se determinó el pH en agua, relación 1:2 (Jackson 1976), P extractable-Olsen (Jackson 1976) y los parámetros b (capacidad máxima de adsorción de P) y k (constante relacionada con la energía de retención) de la isoterma de adsorción de Langmuir (Fox y Kamprath 1970).

Se aplicó un análisis de variancia de P extractable a las variables b y k, con el fin de evaluar el efecto de la aplicación de cal y P sobre ellas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se muestran algunas de las características de los suelos estudiados. Los suelos son moderadamente ácidos de acuerdo con su pH (5.7 a 6.4). Los de origen volcánico presentan bajo conte-

nido de materia orgánica (3.3% a 6.0%); densidad aparente menor de 1 mg · m⁻³; alta capacidad de fijación relativa de P (86% a 95%); bajo contenido de P extractable (menos de 1 mg · kg⁻¹); contenidos bajos de Ca, medios de Mg y altos de K (Etchevers 1989).

pH del suelo

En el Cuadro 3 se muestran los valores de pH de los suelos incubados, durante 45 d, con cal y fósforo. En general, el pH promedio se elevó de 6.0 a 6.3 y 5.6, con la aplicación de 150 mg y 300 mg de CaCO₃ por cada 100 g de suelo.

Fósforo extractable

El Cuadro 4 muestra los valores de P extraído (P-Olsen) de los suelos después del encalado y la aplicación de fósforo. La extracción de P no presen-

Cuadro 2. Algunas características de los suelos estudiados.

Suelo	pH H ₂ O 1:2	DA mg·m ⁻³	MO	Fijación de P %	Arc.	P Bray 1 mg·kg ⁻¹	Ca mg	K cmol(+)	Na kg ⁻¹	CIC efect.	
1	6.1	0.90	4.8	90	26	<1	3.8	1.7	0.9	0.1	6.5
2	6.4	0.90	5.8	86	31	<1	4.7	1.8	1.7	0.3	8.4
3	6.4	0.91	6.0	88	28	<1	4.0	1.7	1.8	0.4	7.9
4	6.1	0.88	5.0	92	30	<1	3.7	0.9	0.9	0.1	5.5
5	5.7	0.86	4.6	95	31	<1	4.9	1.1	0.6	0.1	6.6
6	5.7	0.90	3.3	91	26	<1	5.2	1.7	1.0	0.1	8.0
7	6.1	0.85	3.8	91	25	<1	5.5	1.6	0.9	0.2	7.3

DA = densidad aparente; MO = materia orgánica.

Cuadro 3. Valores de pH en agua (relación 1:2) de los suelos incubados con CaCO₃ y P (promedio de dos determinaciones).

Suelo	0 CaCO ₃			150 mg CaCO ₃ , 100 g P aplicado por mg·kg ⁻¹			300 mg CaCO ₃ , 100 g		
	0	100	200	0	100	200	0	100	200
1	6.0	6.0	6.0	6.3	6.4	6.3	6.6	6.6	6.6
2	6.3	6.3	6.3	6.6	6.6	6.6	6.7	6.7	6.7
3	6.3	6.3	6.2	6.4	6.4	6.3	6.7	6.8	6.7
4	6.0	6.0	6.0	6.4	6.4	6.3	6.7	6.7	6.6
5	5.7	5.7	5.6	6.1	6.1	6.1	6.5	6.5	6.4
6	5.7	5.7	5.7	6.0	6.1	6.0	6.6	6.5	6.5
7	6.0	6.0	6.0	6.5	6.5	6.4	6.7	6.7	6.7

tó un efecto significativo con la cal, pues el P extraído, en cada nivel donde se aplicó, fue más o menos el mismo que en los diferentes niveles de cal. El análisis de variancia de dicha variable (datos no presentados) permitió confirmar lo indicado anteriormente. Estos resultados coinciden con lo señalado por Miramontes y Ortega (1972), en el sentido de que la aplicación de cal no mostró un marcado efecto sobre el P extraído en un suelo derivado de cenizas volcánicas. Sin embargo, de acuerdo con Bowden *et al.* (1980), se esperaba que el P extraído aumentara con el incremento del pH, debido a un crecimiento de la superficie de carga negativa y, por ende, a una mayor repulsión aniónica. Tal vez, el incremento en el pH no fue suficiente como para provocar este efecto. La aplicación de P, a diferencia del encalado, sí mostró un claro efecto en el P extraído, pese a la alta capacidad de retención de P que presentan los suelos.

Capacidad máxima de adsorción (b)

El Cuadro 5 muestra los valores de capacidad máxima de retención de P obtenidos después de la aplicación de cal y fósforo.

Con base en el análisis de variancia de esta variable (datos no presentados) el efecto del encalado no fue significativo. No obstante, en el Cuadro 5 se aprecia que la capacidad máxima de adsorción tendió a subir en algunos suelos mientras que en otros, presentó una ligera disminución.

La Fig. 1 muestra el comportamiento de la adsorción de P con relación al encalado. Las curvas del

suelo 3 muestran que el encalado tendió a incrementar la adsorción en los dos niveles de cal empleados; lo cual se atribuye a la formación de hidróxidos de aluminio y/o fosfatos de calcio (Amarasiri y Olsen 1973; Haynes 1983). En el suelo 5 (Fig. 1b) la adsorción de P disminuyó en todas las concentraciones, con el encalado. La mayor reducción se presentó al aplicar 300 mg $\text{CaCO}_3 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$.

Similares resultados obtuvieron Le Mare y León (1989) en cinco suelos de Colombia, que coinciden con Haynes (1982) en el sentido de que el efecto del encalado sobre la adsorción de P puede ser variable. Tal vez, el incremento del pH (de 6.0 a 6.3 y 6.6 en promedio) con los niveles de cal aplicados no fue suficiente para provocar una reducción significativa de la adsorción de P, tal como era de esperarse de acuerdo con el modelo de adsorción para suelos con carga variable de Bowden *et al.* (1980).

La aplicación de P tampoco presentó un efecto significativo, conforme al análisis de variancia (datos no presentados), sobre la capacidad máxima de adsorción de fósforo. No obstante, en la Fig. 1 se aprecia que la adsorción de P tendió a ser menor, tanto en el suelo 3 como en el 5, con la aplicación del elemento. Este comportamiento, presente en todos los suelos de este estudio, coincide con los resultados de Barrow (1974), quien menciona que la aplicación de P produjo una reducción de su adsorción en el suelo, pues el P retenido en los sitios de adsorción los bloquea de futuras reacciones con fosfato. Smyth y Sánchez (1980) mostraron que el P provoca una reducción mayor de su adsorción que la producida por el encalado con CaCO_3 o CaSiO_3 . La aplicación de cal y P produjo un efecto combinado en todos los

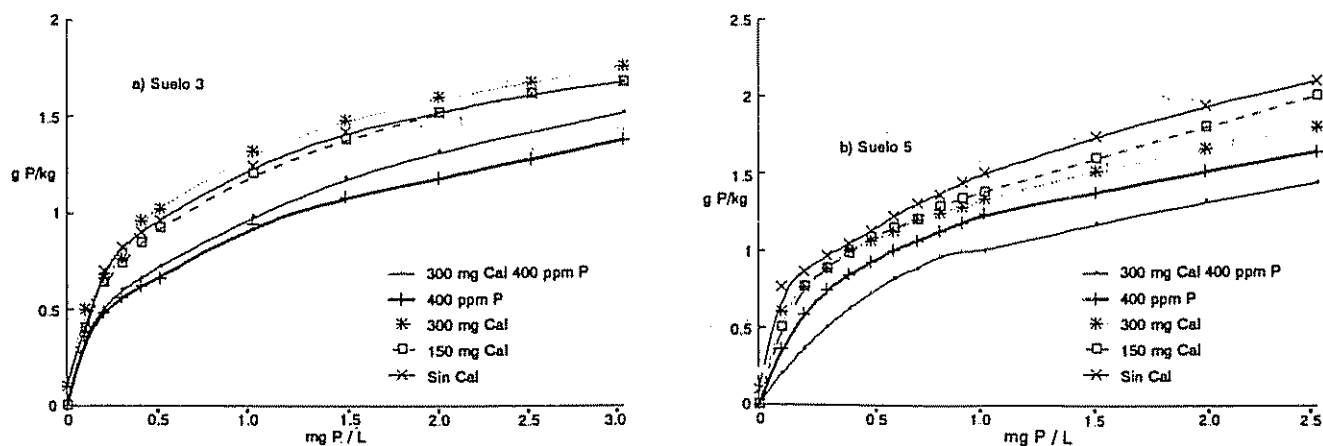


Fig. 1. Relación del P adsorbido con el P en solución a diferentes niveles de cal y fósforo.

Cuadro 4. Fósforo extraído mediante el método de Olsen en suelos incubados con CaCO₃ y P (promedio de dos determinaciones).

Suelo	O CaCO ₃			150 mg CaCO ₃ 100 g ⁻¹ p aplicado mg.kg ⁻¹			300 mg CaCO ₃ 100 g ⁻¹		
	0	200	400	0	200	400	0	200	400
	P mg.kg ⁻¹								
1	t	31	73	t	31	64	t	31	66
2	4	40	67	4	35	77	3	47	73
3	t	33	63	t	25	63	t	38	62
4	t	33	45	t	38	58	t	29	59
5	t	24	55	t	25	58	t	29	59
6	t	22	59	t	22	65	t	30	57
7	t	28	62	t	31	60	t	31	64

t = menos de 1 mg.kg⁻¹Cuadro 5. Valores de capacidad máxima de adsorción derivados de la isoterma de Langmuir, de suelos incubados con CaCO₃ y P (promedio de dos determinaciones).

Suelo	O CaCO ₃			150 mg CaCO ₃ 100 g ⁻¹ P aplicado por mg.kg ⁻¹			300 mg CaCO ₃ 100 g		
	0	200	400	0	200	400	0	200	400
	b mg P.kg ⁻¹ suelo								
1	2020	2033	2062	2010	1957	2062	2036	2012	2062
2	2064	2012	2114	2047	1996	1957	2056	2058	2160
3	2080	2020	2053	2060	1938	2114	2053	2160	2110
4	2080	2075	1192	2060	2037	2257	2019	2012	2151
5	2009	2024	2141	2162	2123	2037	2051	2053	2123
6	2025	1976	2045	2042	2062	2066	2061	1192	2096
7	1192	2100	2008	2089	2062	2037	1198	2110	2070

suelos, excepto en el 5; la adsorción de P se redujo menos que con la aplicación de sólo P (Fig. 1). Lo anterior pudo ser por la formación de fosfatos de calcio al aplicar P y cal (Harrison y Adams 1987; Haynes 1982).

Constante relacionada con la energía de retención (k)

El encalado, la aplicación de P y la combinación de ambos produjeron una disminución en la constante relacionada con la energía de retención de P (Cuadro 6). Esto indica que la fuerza de enlace de las superficies del suelo con el P, es menor cuando se aplica cal, P o ambos y, por lo tanto, este nutrimento

puede estar más disponible para las plantas (Mehadi y Taylor 1988). El análisis de variancia de esta variable (datos no presentados) confirmó la importancia del efecto de los factores estudiados.

CONCLUSIONES

Aunque los efectos del encalado y la aplicación de P sobre la capacidad máxima de adsorción no fueron estadísticamente significativos, las curvas de adsorción muestran que el encalado tendió a incrementar la adsorción de P en unos suelos y a reducirla en otros. La aplicación de P siempre tendió a disminuir la retención, lo que favoreció una mayor concentración de este nutrimento en solución. Sin embargo, la

Cuadro 6. Valores de la constante (k) relacionada con la energía de retención de P derivado de la isoterma de Langmuir de suelos incubados con CaCO₃ y P (promedio de dos determinaciones).

Suelo	0 CaCO ₃			150 mg CaCO ₃ .100 g ⁻¹ P aplicado por mg.kg ⁻¹			300 mg CaCO ₃ 100 g ⁻¹		
	0	200	400	0	200	400	0	200	400
	k L.g ⁻¹ P								
1	2770	1426	922	2569	2129	882	2285	1336	1321
2	1821	1085	625	1824	1222	959	1828	1036	794
3	1823	1547	1002	1874	2253	790	2294	998	1063
4	2695	1826	1679	2392	1642	888	3432	1875	1227
5	4982	2923	1583	2465	1812	1664	3046	2435	948
6	2639	2100	1486	2150	1410	796	2138	1825	1787
7	3124	2147	977	1907	1366	1947	2780	1328	1417

aplicación de cal y P fue menos efectiva en la mayoría de suelos estudiados, que la aplicación de solo fósforo. Los valores de la constante k permiten suponer que la aplicación de cal y/o fósforo facilita una mayor **disponibilidad** de P al disminuir la fuerza con que es retenido.

LITERATURA CITADA

- ALVARADO, L.J. 1990. Efecto de la cal en la disponibilidad de P y los componentes responsables de su fijación. Tesis de Maestría en Ciencias. Méx., Montecillo. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. 146 p.
- ALVAREZ, V. H. 1982. Efecto de los factores cantidad, intensidad y capacidad amortiguadora de fosfato en la evaluación del fósforo disponible, de suelos derivados de cenizas volcánicas de la Meseta Tarasca, Edo. de Michoacán. Tesis de Doctorado en Ciencias. Méx., Chapingo, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. 300 p.
- AMARASIRI, S.L.; OLSEN, S.R. 1973. Liming as related to solubility of P and plant growth in an acid tropical soil. *Soil Science Society of America Proceedings* 37:716-721.
- BARROW, N.J. 1974. Effect of previous additions of phosphate on phosphate adsorption by soils. *Soil Science* 118:82-89.
- BARROW, N.J. 1987. Reactions with variable-charge soils. *Fertilizer Research* 14:1-100.
- BOWDEN, J.W.; NAGARAJAH, S.; BARROW, N.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. 1980. Describing the adsorption of phosphate, citrate and selenite on a variable-charge mineral surface. *Australian Journal of Soil Research* 18:49-60.
- CAJUSTE, L.J.; ALVARADO, L.J.; OLMEDO, B.M.C. 1987. Effect of liming and phosphate fertilizers on the phosphorus retention of some Oxisols. *Agronomy Abstracts (EE UU)* 32:167.
- COORDINACIÓN GENERAL DE LOS SERVICIOS NACIONALES DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA. 1983a. Carta edafológica E13B49. Nueva Italia, escala 1:50 000. Méx., Secretaría de Programación y Presupuesto.
- COORDINACIÓN GENERAL DE LOS SERVICIOS NACIONALES DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA. 1983b. Carta edafológica E13B39. Uruapan, escala 1:50 000. Méx., Secretaría de Programación y Presupuesto.
- ETCHEVERS, B.J.D. 1989. Interpretación de los análisis químicos de suelo. Chapingo, Méx., Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados 16 p. (mimeo).
- FOX, R.L.; KAMPATH, E.J. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 34:902-907.
- FRIESEN, D.K.; JUO, A.S.R.; MILLER, M.J. 1980. Lime and lime phosphorus-zinc interactions in two Nigerian Ultisols. I Interactions in the soil. *Soil Science Society of America Journal* 44:1221-1226.
- HARRISON, R.B.; ADAMS, F. 1987. Solubility characteristics of residual phosphate in a fertilized and limed Ultisol. *Soil Science Society of America Journal* 51:963-969.
- HAYNES, R.J. 1982. Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant Soil* 68:289-308.
- HAYNES, R.J. 1983. Effect of lime and phosphate applications on the adsorption of phosphate, sulfate, and molybdate by a Spodosol. *Soil Science* 135:221-227.

- HOLFORD, I C R. 1983. Effects of lime on phosphate sorption characteristics, and exchangeable and soluble phosphate in fifteen acid soils. *Australian Journal of Soil Research* 21:333-342.
- JACKSON, M L. 1976. Análisis químico de suelos. 3a ed. Trad. al español por J.M. Beltrán. Barcelona. Omega 662 p.
- KALRA, Y P; MAYNARD, D G. 1991. Methods manual for forest soil and plant analysis. For Can., Northwest Reg.; North For. Cent., Edmonton, Alberta. Inf Report NOR-X-319. 116 p.
- LAIRD, J.R. 1984. 25 años de investigación agrícola en la Sierra Tarasca, estado de Michoacán. In *Los suelos de ando y sus implicaciones en el desarrollo agrícola de la Sierra Tarasca*. 2a edición. A.T Santos, O Miranda J (Eds.). Chapingo, Méx. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. p 155-177
- LE MARE, P H; LEON, L A. 1989. The effects of lime adsorption and desorption of phosphate in five Colombian soils. *Journal of Soil Science* 40:59-69
- LOPEZ-HERNANDEZ, D; BURNHAM, C P. 1974. The effect of pH on phosphate adsorption in soils. *Journal of Soil Science* 25:207-216
- MEHADI, A A; TAYLOR, R W. 1988. Phosphate adsorption by two highly-weathered soils. *Soil Science Society of America Journal* 52:627-632
- MIRAMONTES, B; ORTEGA, T E. 1972. Efectos del carbonato y silicato de calcio sobre el rendimiento de soyo y algunas propiedades químicas en tres suelos de México. *Agrociencia Serie C (Méx.)* p. 81-94
- MOKWUNYE, V. 1975. The influence of pH on the adsorption of phosphate by soils from Guinea and Sudan savannah zones of Nigeria. *Soil Science Society of America Proceedings* 39:1000-1002.
- MURRMANN, R P; PEECH, M. 1969. Effect of pH on labile and soluble phosphate in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 33:205-210
- OKAJIMA, H. 1977. Reclamation and improvement of soils derived from volcanic ash. In *Soil derived from volcanic ash in Japan*. Y. Ishizuka, C.A. Black (Eds.). Méx. CIMMYT. p 64-84
- PARFITT, R L. 1978. Anion adsorption by soils and soil materials. *Advances in Agronomy* 30:1-50.
- ROBARGE, W P; COREY, R B. 1979. Adsorption of phosphate by hydroxy-aluminum species on a cation exchange resin. *Soil Science Society of America Journal (EE UU.)* 43:481-487
- SIMS, J T; ELLIS, B G. 1983. Adsorption and availability of phosphorus following the application of limestone to an acid, aluminous soil. *Soil Science Society of America Journal* 47:888-893
- SMYTH, T J; SANCHEZ, P A. 1980. Effects of lime, silicate, and phosphorus applications to an Oxisol on phosphorus sorption and ion retention. *Soil Science Society of America Journal* 44:500-505
- WHITE, R E; TAYLOR, A W. 1977. Effect of pH on phosphate adsorption and isotopic exchange in acid soils at low and high additions of soluble phosphate. *Journal of Soil Science* 28:48-61
- WHITE, R E. 1980. Retention and release of phosphate by soil and soil constituents. In *Soil and agriculture*. P.B. Tinker (Ed.). Oxford, London. Blackwell Scientific Publications. p. 71-114.
- WOODRUFF, J R; KAMPRATH, E J. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. *Soil Science Society of America Proceedings* 29:148-150