

FIJACION DE FOSFORO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZA VOLCANICA

J. Espinosa*

Introducción

Los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles) cubren una apreciable área de América Central y América del Sur. La fracción arcilla de estos suelos está dominada por alofana, imogolita y halloisita (minerales amorfos de rango corto) que provienen de la meteorización de los materiales piroclásticos producto de deposiciones volcánicas. Investigación conducida en los últimos años ha demostrado que los complejos humus aluminio (Al) juegan también un significativo papel en el comportamiento de los Andisoles.

Una de las características más importantes de los Andisoles es su capacidad para inmovilizar (fijar) fósforo (P) en la superficie de los minerales amorfos. Esta es la principal limitante química de los Andisoles. Apparentemente, la capacidad de fijación de P de los Andisoles varía con el tipo de arcilla presente y esto a su vez cambia el efecto residual de las aplicaciones de fosfato. En ciertos cultivos, los estudios de calibración no han logrado correlacionar adecuadamente el contenido de P en el suelo con las recomendaciones de fertilización.

Mecanismos de fijación de P en Andisoles

Inicialmente se consideró que la fijación de P en los Andisoles ocurría solamente en las superficies activas de la alofana y la imogolita. Los mecanismos de fijación de P en la alofana e imogolita incluyen procesos como quemiasorción, desplazamiento de silicio (Si) estructural y precipitación. Sin embargo, se ha reconocido la importancia de los complejos humus-Al en este proceso. La fracción humus en Andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al. El carbono (C) atrapado en estos complejos es inactivo y deja de ser parte del C activo de la fracción orgánica. Por otro lado, los grupos hidroxilo combinados con el Al acomplejado entran en reacciones de intercambio de ligandos con HPO_4^- y H_2PO_4^- como se observa en la Figura 1, fijando fuertemente el P aplicado.

De igual manera, este fuerte acomplejamiento del Al con el humus limita la posibilidad de coprecipitación de Al con Si, liberados de la descomposición de la ceniza volcánica, lo que a su vez limita también la formación de alofana. Estos procesos se han documentado en

Andisoles de Japón, Colombia y Ecuador (Wada y Kakuto, 1985; Inoue e Higashi, 1988; Benavides y Gonzáles, 1988; Zehetner et al., 2003).

La acumulación de humus es mayor en suelos volcánicos localizados a mayor altitud (> 2500 m sobre el nivel del mar). Evidencia indirecta obtenida en Andisoles de Ecuador y Colombia permite concluir que la fijación de P está estrechamente relacionada con el contenido de C en el suelo (complejos humus-Al). Indirectamente, esto también indicaría cuales minerales arcillosos se formarían a partir de la ceniza volcánica en determinadas condiciones y la intensidad de la fijación de P. Apparentemente los suelos alofánicos tienden a fijar menos P.

Datos de un experimento exploratorio de invernadero diseñado para estudiar la relación entre el C total y la fijación de P se presentan en la Tabla 1. Se sembró sorgo en macetas que contenían suelo tratado con diferentes dosis de P. Después de la cosecha, se caracterizó la retención de P en los suelos de cada una de las macetas. Los datos de este experimento sugieren que de hecho existe una estrecha relación entre el C total y la fijación de P. Se observa también que la retención de P no se reduce con las altas dosis de P aplicadas a esté Udand que tiene un alto contenido de C total. Se esperaba que las altas dosis de P podrían satisfacer o al menos reducir la capacidad de fijación de este suelo.

Datos recientes de un estudio de pedogénesis de un transecto del volcán Cotacachi en Ecuador (Tabla 2) confirmaron el hecho de que la fijación de P está asociada directamente con la presencia de C inactivo en el suelo (Zehetner et al., 2003). Se encontraron dramáticas diferencias altitudinales con respecto a la formación pedogenética de los minerales del suelo. Se determinó

Tabla 1. Efecto de las dosis de P en la subsecuente retención de este elemento en dos Andisoles de Ecuador con diferente contenido de carbono.

Dosis de P_2O_5	Carbono total		P fijado después de la primera cosecha	
	Udand	Eutrand	Udand	Eutrand
kg/ha	----- % -----			
0	5.0	1.2	42	14
150	5.3	1.1	40	11
300	4.9	1.1	40	8
450	5.1	1.1	42	8

* INPOFOS Norte de América Latina (PPI/PPIC) - Gaspar de Villarreal 154, Quito - Ecuador. E-mail: jespinosa@inpfos.org

que la fracción arcilla de las zonas situadas a elevaciones superiores a 3200 msnm (sobre el nivel del mar) estaban dominadas complejos humus-Al, las zonas entre 3200 y 2700 m snm por complejos humus-Al y alofana y que bajo 2700 m snm no existe presencia de complejos humus-Al. Diferencias en la zonificación se pueden presentar por efecto de las cambiantes condiciones de humedad y temperatura en las diferentes áreas desarrolladas sobre ceniza volcánica en América Latina.

Desde el punto de vista práctico, es aparente que en Andisoles, el contenido de C total podría ser un buen parámetro para determinar la capacidad de fijación de P de un suelo. En la Figura 2 se presenta la correlación

entre el P fijado y el contenido de C total de 42 Andisoles de Ecuador. Un estudio en Andisoles en Chile (Figura 3) demuestra la misma tendencia al encontrar una buena correlación entre el P retenido por la fracción orgánica y el contenido de C total en el suelo (Briceño et al., 2004). Experimentación de campo deberá confirmar si esta relación se mantiene y cómo estos parámetros se podrían relacionar con el diagnóstico del contenido de P en el suelo y con las recomendaciones de fertilización.

Efecto residual de aplicaciones de P en Andisoles

Datos de investigación de varias partes del mundo han reportado que los estudios de calibración, conducidos

en Andisoles, para correlacionar el P extractable con el rendimiento y los requerimientos de P de los cultivos no han sido siempre exitosos. Uno de estos casos es el cultivo de papa en Andisoles de tierras altas de Colombia, Ecuador, Panamá y Costa Rica. Experimentos de campo conducidos en Andisoles de la Sierra alta de Ecuador (INIAP, 1991) evaluaron la respuesta a la aplicación de P en el cultivo de papa en las mismas parcelas por tres ciclos consecutivos. Los resultados presentados en la Tabla 3 indican que los rendimientos obtenidos en la parcela testigo son bajos aún cuando el contenido de P en el suelo, extraído con NaHCO_3 , es alto (28 ppm). Se supone que el nivel crítico general para estos suelos es 12 ppm. Por otro lado, existió una apreciable respuesta en rendimientos a las dosis crecientes de P en todos los ciclos, indicando que el efecto residual de P es bajo, aún cuando el análisis de suelo no reflejaba este hecho. El contenido de P se incrementó a 38 y 59 ppm en las parcelas que recibieron una aplicación de 300 y 450 kg de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}$, respectivamente. Sin embargo, el rendimiento de tubérculos en el tercer ciclo, en las mismas parcelas, pero sin aplicación de P, fue de nuevo bajo (Tabla 3). La misma tendencia se observa tanto en las aplicaciones bajas como en las aplicaciones altas de P. Se sospecha que existiría la misma tendencia si se hubiesen utilizado otros extractantes en el análisis de P en el suelo. Los datos presentados en la Tabla 3 sugieren que aún aplicaciones de dosis muy altas de P no satisfacen la capacidad de fijación

Tabla 2. Contenidos de C, Al asociado con el C y retención de P en un transecto de suelos derivados de ceniza volcánica alrededor del volcán Cotacachi, Ecuador (Adaptado de Zehetner, 2003).

Horizonte ¹	Carbono ² (%)	Aluminio asociado al carbono ³ (g/kg)	Fijación de Fósforo ⁴ (%)
Pedón 1, 4050 msnm			
A	7.5	7.0	90
AB	3.8	4.4	89
Pedón 2, 3900 msnm			
A1	10.3	10.1	91
A2	4.1	4.9	87
Pedón 3, 3400 msnm			
A	7.7	7.6	88
AC	2.4	4.0	79
Pedón 4, 3000 msnm			
A	3.4	3.6	61
Pedón 5, 2950 msnm			
A1	3.6	3.0	46
A2	3.0	3.4	46
Pedón 6, 3060 msnm			
A	6.4	5.6	74
Pedón 7, 2900 msnm			
A1	3.1	3.0	52
A2	2.2	2.4	48
Pedón 8, 2740 msnm			
Ap	2.3	1.7	26
A	2.1	2.6	38
Pedón 9, 2570 msnm			
Ap	0.9	0.2	4
A1	0.5	0.2	4
Pedón 10, 2560 msnm			
A	0.3	0.2	7
Pedón 11, 2630 msnm			
A	0.6	0.3	6
Pedón 12, 2410 msnm			
A1	0.4	0.1	6
A2	0.6	0.1	6

1 Horizontes de diferente profundidad.

2 Carbono total determinado por combustión seca (Tabatabai and Bremner, 1991).

3 Aluminio asociado con la materia orgánica extraído con pirofosfato de sodio a pH 10 (Wada, 1989).

4 Diferencia después de 16 h de agitación con una solución de 1000 mg/L de P (Soil Survey Staff, 1996).

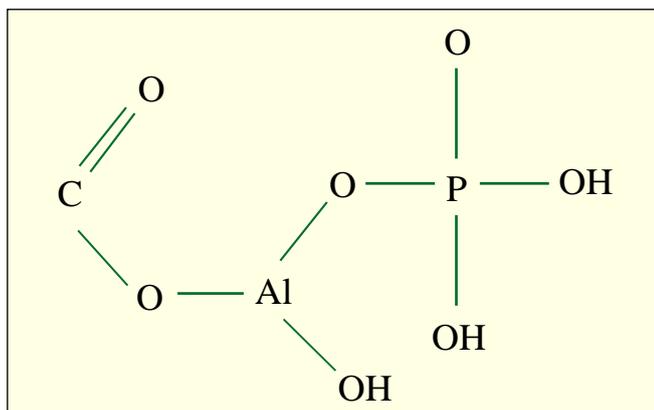


Figura 1. Representación esquemática de la fijación de P en los complejos humus-Al (Sollins, 1991).

de este suelo y el efecto residual es bajo. Para obtener un adecuado rendimiento de tubérculos en este Andisol es necesaria la aplicación de P en cada ciclo.

El suelo utilizado en los experimentos descritos anteriormente (Udand) es típico de las áreas productoras de papas de Ecuador, Colombia, Panamá y Costa Rica. El contenido de carbono en este suelo es 5.3% y se considera que los complejos humus-Al serían los componentes dominantes en la fracción arcilla. Es difícil distinguir entre suelos dominados por alofana, imogolita o complejos humus-Al, y hasta hace poco, los suelos conteniendo estos minerales estaban agrupados en el suborden Andept en el orden de los Inceptisoles. A partir de 1988 se creó un nuevo orden de suelos denominado Andisol para agrupar todos los suelos derivados de materiales volcánicos (ICOMAND, 1986; Arnold, 1985). Este nuevo agrupamiento dentro de la taxonomía de suelo permite la separación de los suelos dominados por complejos humus-Al de los suelos dominados por alofana e imogolita. Este hecho podría permitir una mejor caracterización de la fijación de P en suelos derivados de ceniza volcánica.

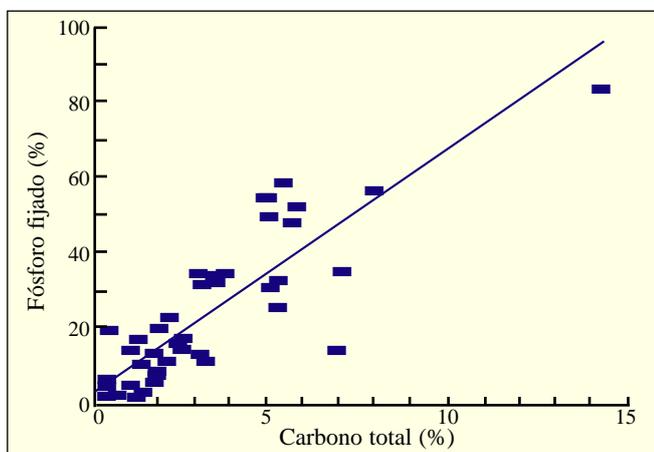


Figura 2. Correlación entre el contenido de C total y el porcentaje de fijación de P en Andisoles de Ecuador (Espinosa et al., 1987).

Experimentos de largo plazo han demostrado que los niveles críticos de P, considerados adecuados para un cultivo en un tipo particular de suelo, cambian cuando se siembra otro cultivo en la rotación. Observaciones similares se han reportado en suelos volcánicos de Ecuador y Colombia. Como se discutió anteriormente, el efecto residual de las aplicaciones de P en el cultivo de la papa es bajo en este tipo de suelos, pero lo contrario ocurre con mezclas forrajeras sembradas en el mismo suelo. La Tabla 4 ilustra la falta de respuesta a la aplicación de P en el cultivo de pastos, cuando el contenido de P en el suelo es alto (35 ppm extraídos con NaHCO_3), observándose además un buen efecto residual. Este comportamiento sugiere que existen diferentes niveles críticos de P para diferentes cultivos sembrados en el mismo Andisol.

Los datos de calibración y correlación entre el rendimiento de papa y el contenido de P en el suelo (extraído con solución Olsen modificada) determinaron que el nivel crítico de P para papa en Andisoles es de 42 ppm (Figura 4). Este trabajo de correlación permite utilizar el análisis de suelos como una adecuada herramienta para diseñar recomendaciones de fertilización en papa en Andisoles. Resultados similares se han reportado en Andisoles de Costa Rica y Colombia.

La violenta actividad volcánica ocurrida en el pasado envió cenizas a la atmósfera, las cuales se movieron largas distancias antes de depositarse en la superficie. Esta es la razón por la cual existen suelos derivados de cenizas volcánicas a considerables distancias del punto de origen. Algunos de estos suelos se han desarrollado en ambientes de alta humedad y temperatura localizados a bajas altitudes. Se sospecha que en estos suelos la cantidad de alofana e imogolita es alta, pero el color del suelo continua siendo oscuro y en la clasificación taxonómica antigua estaban clasificados como Dystrandepsts, exactamente igual a los Andisoles de mayor altura que supuestamente tienen mayor

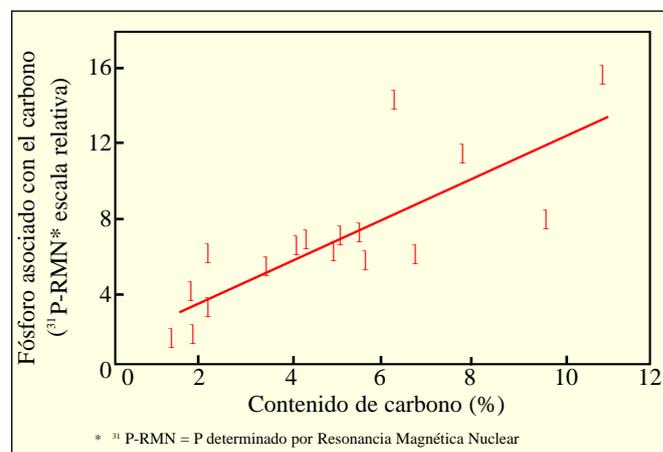


Figura 3. Correlación entre el contenido de C total y el porcentaje de fijación de P en Andisoles de Chile (Briceño et al., 2004).

Tabla 3. Efecto residual de P en el rendimiento de papa y la relación con el contenido de P según el análisis de suelo en un Udand de la Sierra Alta de Ecuador.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Nivel de P* ppm
P ₂ O ₅ kg/ha	Rendim. t/ha	P ₂ O ₅ kg/ha	Rendim. t/ha	P ₂ O ₅ kg/ha	Rendim. t/ha	
0		0	6.04	0	6.37	28
0	3.09	0	5.90	300	32.39	41
0		300	39.34	300	31.19	46
150		0	9.90	0	8.33	28
150	18.46	150	32.65	0	11.32	32
150		150	35.44	150	34.45	40
300		0	15.92	0	7.90	27
300	27.60	300	36.54	0	12.44	38
300		300	39.86	300	32.63	64
450		0	18.84	0	13.21	34
450	27.74	450	42.55	0	24.09	59
450		450	45.12	450	28.28	89

* Contenido de P en el suelo después del tercer ciclo; P extraído con NaHCO₃ (Olsen).

Tabla 4. Efecto de la aplicación y de la residualidad de P en el rendimiento de materia seca de una mezcla forrajera en un Udand de la Sierra Alta de Ecuador.

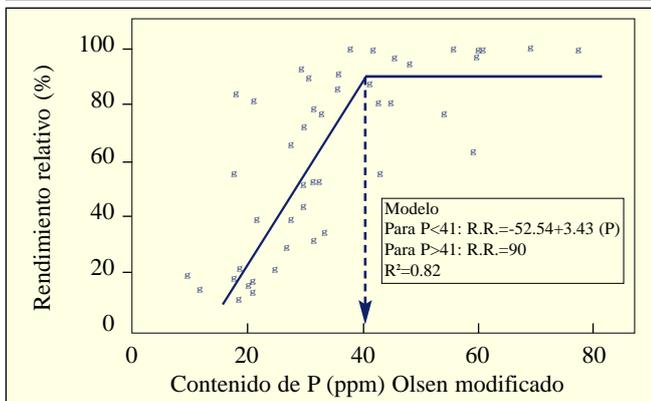
Dosis de P ₂ O ₅ kg/ha	Primera Cosecha	Cuarta Cosecha
0	3.6	3.4
100	3.8	3.7
200	3.3	4.3

P aplicado antes de la siembra de la mezcla forrajera
Contenido inicial de P = 35 ppm extraído con NaHCO₃

Tabla 5. Respuesta del maíz a la aplicación de P en un Udand de la Costa Tropical de Ecuador.

Dosis de P ₂ O ₅ kg/ha	Rendimiento t/ha
0	7.5
40	8.4
80	8.3
120	8.1

Contenido inicial de P = 12 ppm extraído con NaHCO₃

**Figura 4. Determinación del nivel crítico para papa en Andisoles de altura (> 2500 msnm) en base a los estudios de calibración.**

contenido de complejos humus-Al. En el caso de estos suelos desarrollados en diferente ambiente, el nivel crítico de 12 ppm de P en maíz ubica razonablemente bien la respuesta a la aplicación de P. Un ejemplo se presenta en la Tabla 5 (INIAP, 1990). Sin embargo, son necesarios estudios de calibración para afinar este nivel crítico, particularmente con los nuevos híbridos de alto rendimiento.

Bibliografía

- Benavides, G. y E. Gonzales. 1988. Determinación de las propiedades Andicas y clasificación de algunos suelos de páramo. Suelos Ecuatoriales 17 :58-64.
- Briceño, M., M. Escudey, G. Galindo, D. Borchard, and A. Chang. 2004. Characterization of chemical phosphorus forms in volcanic soils using 31P-NMR spectroscopy. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 35 (9-10): 1323-1337.
- ICOMAND. 1986. International committee on the Classification of Andisols. Circular Letter N° 8.
- INIAP. 1991. Departamento de Suelos y Fertilizantes, Estación Exp. Sta Catalina. Informe técnico 1990. Quito, Ecuador.
- INIAP. 1991. Departamento de Suelos y Fertilizantes, Estación Exp. Tropical Pichilingue. Informe técnico 1990. Quevedo, Ecuador.
- Inoue, K. and T. Higashi. 1988. Al and Fe-Humus complexes in Andisols. In D. Kinloch, S. Shoji, F. Beinroth and H. Eswaran (eds.), Proceedings of the Ninth International Soil Classification Workshop, Japan, 20 July to 1 August, 1987. Published, by Japanese Committee for the 9th International Soil Classification Workshop, for the Soil Management Support Services, Washington, D.C., USA.
- Sollins, P. 1991. Effects of soil microstructure on phosphorus sorption in soils of the humid tropics. In H. Tielsen, D. Hernandez López and L. Salcedo (eds.), Phosphorus cycles in terrestrial and aquatic ecosystems. Saskatchewan Institute of Pedology. Saskatoon, Canada.
- Wada, K., and Y. Kakuto. 1985. Embryonic halloysites in Ecuadorian soils derived from volcanic ash. Soil Sci. Soc. Am. J. 49:1309-1318.
- Zehetner, F., W.P. Miller, and L.T. West. 2003. Podogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. Soil Sci. Soc. Am. J. 67:1797-1809. ☀