

Resumen

El fósforo es uno de los elementos necesarios para el completo desarrollo de las plantas. Estas toman los nutrientes de la fase acuosa del suelo denominada solución del suelo. Allí están los elementos de forma disponible-soluble para la absorción radical. Sin embargo, existen múltiples interacciones físicas y químicas que inhabilitan dicha disponibilidad, ello caracteriza la mayor o menor capacidad de un suelo para entregar, en este caso, fósforo disponible para la nutrición vegetal. La disponibilidad puede resultar de fenómenos naturales propios de la dinámica edáfica, sin embargo, algunas reacciones químicas pueden ser inducidas antrópicamente. Este trabajo evaluó si la adición de sílice solubiliza el fósforo, si esta solubilidad depende de la dosis y del tipo de suelo. Para ello se evaluaron ocho dosis de un producto comercial a base de $MgSiO_2$ sobre dos suelos del oriente del departamento de Antioquia, Colombia (andisol y entisol), contrastantes entre sí para la retención del elemento evaluado. Bajo las condiciones planteadas en esta investigación, se encontró que el andisol retiene con mayor fuerza el fósforo que el entisol, en consecuencia, los contenidos del elemento en solución fueron menores que en el entisol. Para el andisol la dosis de 1.5 Mg ha^{-1} de $MgSiO_2$ fue la que logró la mayor solubilidad (0.52 mg L^{-1}). Para el entisol la mayor solubilidad (0.78 mg L^{-1}) se logró con la adición de 3.5 Mg ha^{-1} de $MgSiO_2$.

Palabras clave

Silicio, disponibilidad, suelo, fósforo, fertilizante.

1 Agrónoma. Grupo Biotecnología Vegetal. Universidad Católica de Oriente. mfgomez@unal.edu.co

2 Ingeniero Agrónomo. M. Sc. Docente asistente. Grupo Biotecnología Vegetal. Universidad Católica de Oriente. fchica@uco.edu.co

3 Agrónomo, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Católica de Oriente

4 Tecnóloga Agropecuaria, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Católica de Oriente

Abstract

Phosphorus is one of the necessary elements for the complete development of plants. These take the nutrients from the aqueous phase of the soil, which is called soil solution. There are elements of available-soluble form for radical absorption. However, there are multiple physical and chemical interactions that disable such availability, this characterizes the greater or lesser capacity of a soil to deliver, in this case, available phosphorus for plant nutrition. Availability may result from natural phenomena characteristic of soil dynamics, however, some chemical reactions may be induced anthropically. This work evaluated whether the addition of silica solubilizes phosphorus, if this solubility depends on the dose and the type of soil. For this, eight doses of a commercial product based on MgSiO_2 were evaluated on two soils of the eastern department of Antioquia, Colombia (andisol and entisol), contrasting each other for the retention of the evaluated element. Under set conditions for this research, it was found that andisol retains more strongly phosphorus than entisol, consequently, the contents of the element in solution were lower than in entisol. For andisol the dose of 1.5 Mg ha^{-1} of MgSiO_2 was the one that achieved the highest solubility (0.52 mg L^{-1}). For entisol the highest solubility (0.78 mg L^{-1}) was achieved with the addition of 3.5 Mg ha^{-1} of MgSiO_2 .

Key words

Silica, availability, soil, phosphorus, fertilizer

Introducción

En términos generales el fósforo es el elemento de mayor fijación en todos los tipos de suelos, está sujeto a procesos de transformación continua que incluyen consumo o desprendimiento en sus diferentes formas, por consiguiente, está dentro de los elementos de menor optimización en la fertilización agrícola (Sánchez, 1981). Este problema se agudiza en el oriente antioqueño, el cual está cubierto aproximadamente en un 90 % por suelos clasificados dentro del orden andisoles (Jaramillo Parra y González, 1994), los cuales se caracterizan por poseer altos contenidos de materia orgánica y alta capacidad de fijar fosfatos necesarios para las plantas.

Una de las alternativas más recomendadas para aumentar la disponibilidad de fósforo en el suelo consiste en aplicar altas cantidades de fertilizantes. Para ello, se utilizan fertilizantes fosfóricos de rápida disponibilidad, como el superfosfato triple (SPT), el fosfato diamónico (DAP) y el fosfato monoamónico (MAP); los cuales para el año 2014 presentaron tendencias crecientes en costos de manufacturación, con variaciones del 33 % (MADR, 2014). Según Casanova, Barbazan y Barreto (2014), las variaciones en los precios del fertilizante radican en la distribución geográfica de los yacimientos de fósforo; de la roca fosfática que se explotan anualmente más del 75 % proviene de China, Marruecos, EE. UU. y Rusia, consecuentemente los impuestos arancelarios son altos y se reflejan en el costo de venta final del producto.

El uso exagerado de fertilizantes ha provocado una demanda cada vez mayor de fósforo natural, al ritmo actual de extracción, los ee. uu. agotarán sus reservas dentro 30 años, y las reservas mundiales comenzarán a utilizarse dentro de los próximos 75-100 años. La extracción de fosfato alcanzará su punto máximo alrededor del año 2030; después de lo cual la demanda será superior a la oferta (Gutiérrez y Álvarez, 2013).

El fósforo no puede fabricarse a partir de fuentes alternativas, pero puede ser recuperado y reutilizado. La sílice asimilable, tanto en forma sólida como líquida, se presentan como una herramienta útil para tratar suelos con baja fertilidad y aumentar la disponibilidad de fósforo adsorbido por las arcillas y/o precipitado por otro elemento; consecuentemente mitigaría la sobreutilización de fertilizantes fosfatados contribuyendo a la economía de los productores y a la conservación del medio ambiente.

Hasta ahora son escasas las iniciativas para promover el reciclaje y pocas las investigaciones que emplean minerales para solubilizar y/o des-adsorber el fósforo. En el 2008 Matichenkov afirmó que el anión del ácido monosilícico $[\text{Si}(\text{OH})_3]^-$ puede reemplazar el anión fosfato $[\text{HPO}_4]^{2-}$ del calcio, del magnesio, del aluminio y fosfatos de hierro al que se encuentren fijados, lo que puede ocasionar un incremento del fósforo en la solución del suelo.

El objetivo de esta investigación fue evaluar en dos suelos del Oriente antioqueño, el efecto solubilizador de la sílice sobre el fósforo y si la solubilidad depende de la dosis de sílice utilizada y del tipo de suelo.

Materiales y métodos

Campo

De acuerdo al estudio de suelos del departamento de Antioquia (Instituto Geográfico Agustín Codazzi —IGAC— 2007), se realizó un recorrido por el Oriente antioqueño para identificar y recolectar los suelos de interés. Se efectuó una descripción taxonómica a nivel de orden, utilizando la clasificación propuesta por el Departamento de Agricul-

tura de los Estados Unidos —USDA— (1999). Para evidenciar la presencia de componentes no cristalinos (alófanos) se utilizó la reacción de Fieldes y Perrot (1966). Adicionalmente se tomaron muestras para determinar la densidad aparente y cuantificar el contenido de fósforo (P), inicial en la solución del suelo (mg L^{-1}). Finalmente, se retiró la capa vegetal y se colectó el horizonte A del suelo para las pruebas experimentales. En la figura 1 se presentan los perfiles característicos de los órdenes identificados.



Perfil 1



Perfil 2

Figura 1. Perfiles característicos de los suelos evaluados.

Fuente: Gómez-García y Chica-Toro

Experimental y laboratorio

La determinación de la densidad aparente (da) fue a través de la metodología del cilindro biselado, reportada por Jaramillo (2014). Para conocer los valores iniciales de P en solución en mg L^{-1} del suelo, se realizó el protocolo de pasta saturada (IGAC, 1969) y se desarrolló la metodología descrita por Hanna-HI 83200 para cuantificar los contenidos iniciales en la solución del suelo.

Para establecer la dosis del producto comercial a base sílice que mayor fósforo solu-

bilizó bajo un diseño completamente al azar con un arreglo factorial $8 \times 2 + 2$. Se tomaron 200g de suelo en base seca de cada orden y se incubaron con dosis crecientes de un producto comercial a base de sílice, correspondientes a 0.5-1-1.5-2-2.5-3-3.5 y 4 Mg ha^{-1} más un testigo sin adición de producto-Testigo relativo (tabla 1), cada dosis se repitió cinco veces para un total de 90 unidades experimentales. A la cuarta semana se cuantificó para cada unidad experimental el P en solución en mg L^{-1} , empleando las metodologías del IGAC (1969) y Hanna - HI 83200.

Tabla 1. Estructura de los tratamientos

Orden	Dosis producto comercial a base de sílice (Mg ha^{-1})	Tratamiento
andisol	0.5	1
	1	2
	1.5	3
	2	4
	2.5	5
	3	6
	3.5	7
	4	8
	0	9
entisol	0.5	10
	1	11
	1.5	12
	2	13
	2.5	14
	3	15
	3.5	16
	4	17
	0	18

El experimento se desarrolló en instalaciones de la Universidad Católica de Oriente, ubicada en el municipio de Nuestra Señora de Arma de Rionegro, ubicada a 2120 m. s. n. m., con temperatura media anual de 18 °C, humedad relativa del 87 % y una precipitación anual promedio que oscila entre 1800-2500 mm.

Resultados y discusión

Inicialmente se utilizó el *Estudio de suelos para el departamento de Antioquia* (IGAC, 2007) para ubicar las zonas con presencia de suelos contrastantes a nivel de orden, para la característica de retención de fósforo. Un suelo con alta retención como los andisoles (Jaramillo, 1995) y otro de menor retención como un Inceptisol o un entisol (Jaramillo, González

y Parra, 1994). De acuerdo con los parámetros físico-químicos (tabla 2) y las descripciones de campo, realizadas en las zonas seleccionadas, se identificaron taxonómicamente dos órdenes de suelos: andisol y entisol, estos cumplen con las características químicas requeridas. Para su descripción se utilizó la clasificación propuesta por El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1999). Sus perfiles característicos y ubicación se presentan en la figura 2.

Tabla 2. Características físico-químicas generales de los suelos estudiados, medidos en el complejo de intercambio y solución del suelo.

Orden	Textura			pH	%M.O	Al	Ca	Mg	K	Na	CICE	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	%A	%L	%Ar			cmolc kg ⁻¹						mg kg ⁻¹						
andisol	70	28	2	5.5	21.7	N/A	4.9	1.3	0.97	0.06	7.2	10	3	143	3	1	5	0.15
entisol	58	26	16	5.5	5.8	N/A	3.8	1.4	0.16	0.05	5.4	19	9	225	7	4	3	0.20

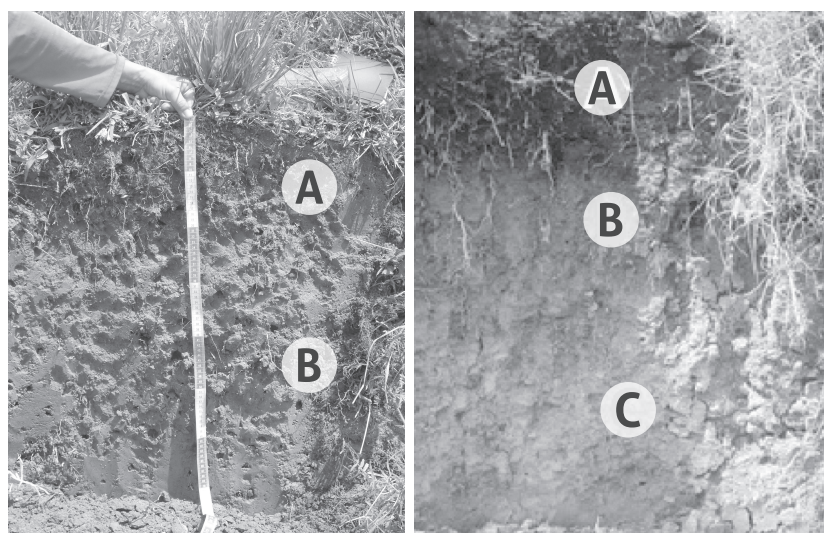


Figura 2. Perfiles característicos: izq. entisol (N 06° 0,9' 35" W 075° 21,14' 14,08"). Der. andisol (N 06° 05', 727" W 075° 20', 74").

Fuente: Gómez-García y Chica-Toro.

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de P en la solución del suelo para cada tratamiento en cada orden de suelo, relacionada con la dosis de producto utilizado a base de sílice (MgSiO₂).

Tabla 3. P en mg L⁻¹ presente en la solución de los suelos evaluados. * Valores correspondientes al promedio aritmético de las cinco repeticiones por tratamiento.

Dosis MgSiO ₂ ha ⁻¹	*P en solución (mg L ⁻¹)	
	andisol	entisol
0.5	0.42	0.72
1.0	0.40	0.52
1.5	0.52	0.68
2.0	0.46	0.64
2.5	0.48	0.70
3.0	0.32	0.70
3.5	0.36	0.78
4.0	0.36	0.78
0.0	0.30	0.30

Para determinar el efecto solubilizador de sílice sobre el fósforo, si la dosis del producto utilizado incidió sobre la reacción y si esta depende del tipo de suelo, los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza de dos vías y pruebas de medias. Se presentó diferencia estadísticamente significativa entre suelos (P = 0.000). De ahí que se procedió a realizar análisis para cada suelo. Para blin-

dar los resultados del error tipo II y debido a que los equipos con los que se procesaron las muestras no fueron de alta gama-precisión, se tomó la decisión de trabajar con un nivel de significancia del 10 % (valor P = 0,1). Se utilizó el programa Statgraphics Centurion 16,5.

El análisis de varianza de los datos de fósforo en solución de suelo para el orden andisol arrojó un valor P = 0.2098. Este resultado significa que no se presentó diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos. Desde el punto de vista estrictamente estadístico la adición de MgSiO₂, independientemente de la dosis, no logra solubilizar cantidades de fósforo suficientemente diferentes para este suelo. Sin embargo, como se observa en la tabla 3, el tratamiento que utilizó 1.5 Mg de MgSiO₂ ha⁻¹ logró solubilizar 0.52 mg L⁻¹ de P en solución, unos 0.12 mg L⁻¹ más que el tratamiento testigo relativo (0 g de MgSiO₂ ha⁻¹). Adicionalmente en la tabla 3 se aprecia como todas las dosis experimentadas de MgSiO₂ lograron solubilizar P, al obtener valores mayores a 0.3 mg L⁻¹ de P correspondiente al tratamiento que no utilizó MgSiO₂ ha⁻¹. Los tratamientos que utilizaron dosis de 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 y 4.0 Mg de MgSiO₂ ha⁻¹ no presentaron concentraciones mayores de P en solución frente a la dosis de 1.5 Mg de MgSiO₂ ha⁻¹. Esto indica que, bajo el protocolo seguido en esta investigación, dosis mayores de MgSiO₂ no se relacionan directamente con un aumento del P en la solución del suelo.

Para orientar los resultados respecto a darle cumplimiento a los objetivos planteados, la medición de la variable respuesta (P en solución) para el andisol indica que no obstante los análisis estadísticos, el MgSiO₂ si solubiliza P y que dosis crecientes de MgSiO₂ no se relacionan directamente con el aumento de P en la solución del suelo; y que es suficiente una do-

sis de 1.5 MgSiO₂ ha⁻¹ para alcanzar la máxima solubilidad del P (figura 3). Al respecto, Caicedo y Chavarriaga (2007), demostraron que existe correlación entre el silicio y el fósforo, al argumentar que el silicio aumenta la disponibilidad del fósforo y estimula el crecimiento de la raíz en plántulas de café; posiblemente debido a un intercambio de los fosfatos adsorbidos a las arcillas por los hidróxidos de silicatos, lo que hace que los fosfatos retenidos pasen a la solución del suelo, aumentando su concentración y resulte disponible para la planta. Ratifi-

cando lo anterior, en un estudio realizado por Guerrero y Cabrera (1972) en suelos volcánicos de los departamentos de Cauca y Nariño, se determinó que incrementos en el contenido de SiO₂ (100 %) disminuyen a niveles estadísticamente detectables la precipitación total de fósforo (11,2 %), en especial la generada hacia los fosfatos de hierro, provocando así un incremento significativo del fósforo aprovechable (Bray II). Igualmente, un incremento en el contenido de SiO₂ hizo que la correlación entre Si y P aprovechable fuera alta.

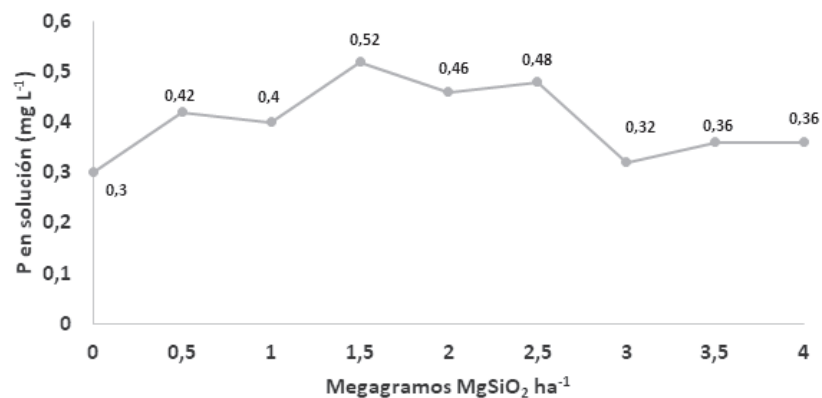


Figura 3. Comportamiento de la solubilidad del P respecto a la adición de MgSiO₂ en un andisol del Oriente antioqueño.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de varianza de los datos del P en solución de suelo para el orden entisol arrojó un valor P = 0.0924. Este resultado significa que se presentó diferencia estadísticamente significativa entre los tratamientos. Al presentarse esta diferencia los datos se sometieron a una prueba de medias de Duncan con un 90 % de significancia. En la tabla 4 y figura 4 se presentan las medias y los grupos homogéneos.

Tabla 4. Prueba de medias Duncan (90 %) para mg L⁻¹ de P en solución de un entisol del Oriente antioqueño.

Dosis MgSiO ₂ ha ⁻¹	Repeticiones	Media (mg L ⁻¹ de P)	Grupos Homogéneos
0	5	0.30	A
1	5	0.52	AB
2	5	0.64	B
1.5	5	0.68	B
2.5	5	0.70	B
3	5	0.70	B
0.5	5	0.72	B
4	5	0.78	B
3.5	5	0.78	B

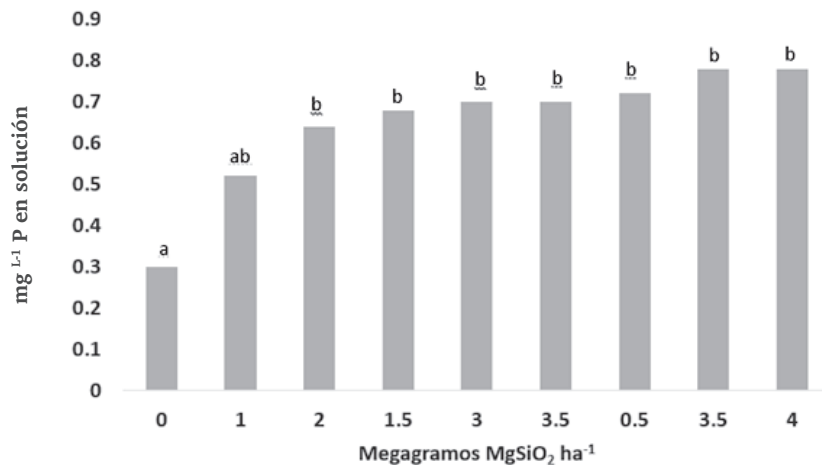


Figura 4. Grupos homogéneos para mg L⁻¹ de P presente en solución de un entisol del oriente antioqueño. Valores con letras en común no presentan diferencia estadísticamente significativa entre ellos (Duncan con un nivel de significancia del 90 %).

Fuente: Elaboración propia.

Excepto la dosis de 1 Mg de MgSiO₂ ha⁻¹, los demás tratamientos lograron solubilizar más de un 100 % del P presente en el suelo frente al tratamiento de 0 MgSiO₂ ha⁻¹(figura 4).

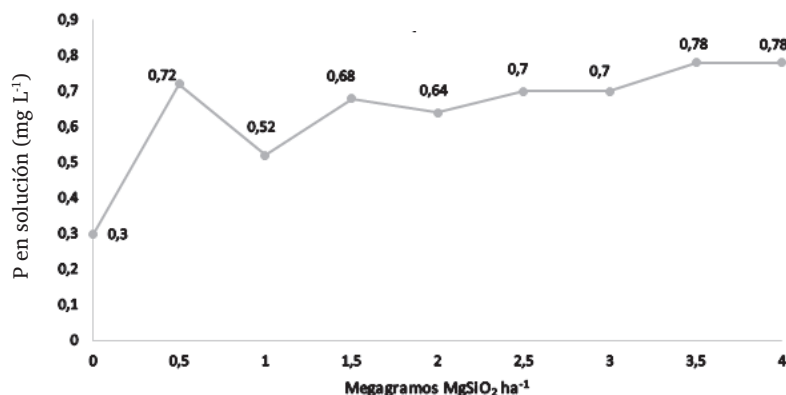


Figura 5. Comportamiento de la solubilidad del P respecto a la adición de MgSiO₂ en un entisol del Oriente antioqueño.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4 y figuras 4 y 5 se observa que todos los tratamientos lograron una mayor solubilidad de P en solución respecto al tratamiento testigo relativo (0 MgSiO₂ ha⁻¹) para el suelo evaluado. La mayor cantidad de P en solución (0.78 mg L⁻¹) se logró con los tratamientos que adicionaron 3.5 y 4.0 MgSiO₂ ha⁻¹. El menor valor para P en solución (0.52 mg L⁻¹) se reportó con el tratamiento que adicionó 1.0 MgSiO₂ ha⁻¹. No obstante, la prueba de medias (figuras 4 y 5) indican que todos los valores obtenidos para la variable respuesta superan al testigo, sin embargo, entre estos valores no se presenta diferencia estadísticamente significativa. Ello indica que da igual, reiteramos desde el punto de vista estadístico, aplicar 0.5 MgSiO₂ ha⁻¹ que 4.0 MgSiO₂ ha⁻¹ para superar el testigo. La decisión de cuál dosis

aplicar tendría que ver con la evaluación de varias especies vegetales y su respuesta a las concentraciones de P en solución obtenidas, tema de otra investigación.

Para orientar los resultados respecto a darle cumplimiento a los objetivos planteados, la medición de la variable respuesta (P en solución) para el entisol indica que el MgSiO₂ si solubiliza P y que dosis crecientes de MgSiO₂ no se relacionan directamente con el aumento de P en la solución del suelo; y que es suficiente una dosis de 3.5 MgSiO₂ ha⁻¹ para alcanzar la máxima solubilidad del P (0.78 mg L⁻¹).

Para dilucidar si el efecto de la adición de MgSiO₂ sobre la solubilidad del P presente en la solución del suelo, en la figura 6 se compararon los resultados obtenidos para los órdenes evaluados.

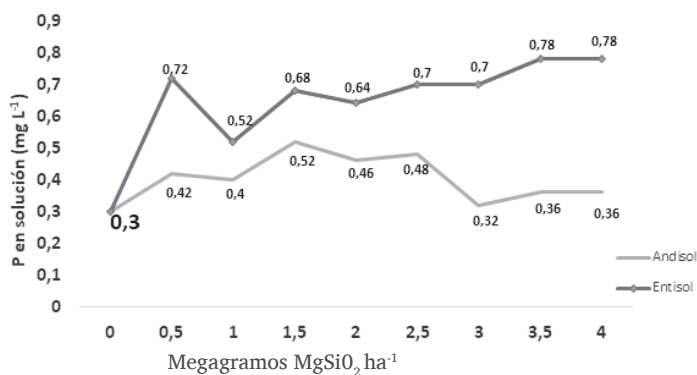


Figura 6. Comportamiento de la solubilidad del P respecto a la adición de MgSiO₂ en un entisol y andisol del Oriente antioqueño.

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que para ambos suelos el testigo relativo, sin adición de MgSiO₂, presentó idéntica concentración de P en solución (0.3 mg L⁻¹). Sin embargo, la respuesta a los tratamientos fue diferente. Para el caso del entisol la adición de cualquier dosis de MgSiO₂ supera los valores de la variable respuesta obtenidos para el andisol. El valor más alto de P en solución alcanzado para el andisol fue de 0.52 mg L⁻¹, el cual coincide con el valor más bajo reportado para el entisol. Significa esto que evidentemente el suelo andisol retiene con mayor fuerza el P, en tanto su solubilidad es menor. Al respecto Campos, Etchevers e Hidalgo (2001), argumentan que la capacidad amortiguadora o *buffer* de este tipo de suelos proveniente de materiales volcánicos es muy alta, existe una resistencia por parte de las arcillas hacia los cambios inducidos, es posible que la presencia de alófanas inhabilite la acción del Sílice, impidiendo la des-adsorción del fósforo, entre otros elementos como el potasio, hierro, etc. También exponen que adicional al efecto de los materiales volcánicos como

las alófanas, los altos contenidos de materia orgánica, característicos de los andisoles, pueden adsorber los iones des-adsorbidos provenientes de las arcillas.

Conclusiones

Bajo el protocolo desarrollado en esta investigación y para los suelos evaluados, la sílice sí tiene un efecto solubilizador sobre el fósforo.

Dosis crecientes de MgSiO₂ no se relacionaron directamente con los contenidos de fósforo en la solución del suelo. Para el andisol la máxima solubilidad se logró con el tratamiento que propuso 1.5 Mg de MgSiO₂ ha⁻¹; en tanto para el entisol igual efecto se alcanzó con el tratamiento que propuso 3.5 Mg de MgSiO₂ ha⁻¹.

El tipo de suelo sí tiene efecto sobre la solubilización el fósforo. El andisol disminuye el efecto solubilizador del Si. Para todos los tratamientos utilizados, los valores de la variable respuesta (mg L⁻¹ de P en solución), alcanzo mayores valores en el entisol frente al andisol.

Referencias Bibliográficas

- Caicedo, L. y Chavarriaga, W. (2007). Efecto de la aplicación de dosis de silicio sobre el desarrollo en almácigo de plántulas de café variedad Colombia. *Agronomía*. 15(1): 27 - 37, 2007.
- Campos Cascaredo, A., Oleschko, K., Cruz Huerta, L., Etchevers, B., Jorge, D. e Hidalgo, M. C. (2001). Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra Latinoamericana*, 19, (2), abril-junio.
- Casanova, O., Barbanza, M. y Barreto, P. (2014). Tecnología de los fertilizantes. Curso de fertilidad de suelos y su manejo.
- Fieldes, F. J. y Perrot, K. W. (1966). The nature of allophane in soil. Part 3. Rapid field and laboratory test for allophanes. *N. Z. J. Sci.* 9, 623- 629.
- Guerrero, R. y Cabrera, T. (1972). *Estado y fijación del fósforo en suelo volcánicos del sur de Colombia*. Segundo panel sobre suelos volcánico de América, ICA, Universidad de Nariño y OEA.
- Gutiérrez, M. I.; Álvarez, P. R. (2013). *Yacimientos de fosfatos: Origen. Ubicaciones, aplicaciones de los derivados de fosfatos y diseño de una planta de tratamiento*. Universidad de Cantabria. Cantabria, España.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi —igac—. (2007). *Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Antioquia*. Bogotá.
- Jaramillo J., D. F; Parra S., L. N. y González S., L. H. (1994). *El recurso suelo en Colombia: Distribución y evaluación*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Jaramillo, J., D. F. (1995). *Andisoles del Oriente antioqueño, caracterización química y fertilidad*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Jaramillo, J. D. (2014). *El suelo: origen, propiedades y espacialidad*. Editorial Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural —madr—. (2014). *Precios de fertilizantes y plaguicidas*. Recuperado de: <https://www.minagricultura.gov.co/planeacion-control> gestión.
- Matichenkov, V. V. (2008). *Deficiencia y funcionalidad del sílice en suelos, cosechas y alimentos*. II Conferencia internacional sobre eco-biología del suelo y el compost. Puerto de la Cruz, Tenerife.
- Sánchez, P. (1981). *Suelos del trópico*. San José, Costa Rica: Dirección de información pública y comunicaciones del Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura (iica).
- United States Department of Agriculture —usda—. (1999). *Soil Taxonomy*. (2.ª ed.). Washington, D.C.
-