

EVALUACIÓN DE LA ADSORCIÓN DE FÓSFORO ASOCIADO AL MANEJO AGROECOLÓGICO EN SUELOS DEL ESTADO AMAZONAS EMPLEANDO ISOTERMAS DE FREUNDLICH

SUSANA PINTO-CASTILLA ^{1,2}, GLORIA M. ESCALONA P. ², PAULINO BETANCOURT ²

¹ Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Centro de Química “Dr. Gabriel Chuchani”, Laboratorio de Físicoquímica de Superficies, Caracas, Venezuela.

² Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Laboratorio de Desarrollo de Procesos, Caracas, Venezuela.

e-mails: cspc99@gmail.com / gmep10@gmail.com / paulino.betancourt@gmail.com

Recibido: mayo 2018

Aprobado para publicación: mayo 2019

RESUMEN

Se estableció un diseño experimental para estudiar los cambios en la adsorción de fósforo en un suelo ubicado al noroeste del estado Amazonas, a fin de evaluar su disponibilidad al aplicar diferentes enmiendas agroecológicas. En este sentido, se incorporaron los fertilizantes inorgánicos: NPK 14-14-14 y roca fosfórica (RF). Adicionalmente, se establecieron los cuatro sistemas: sabana natural (SN), abono orgánico (AO), abono verde (AV) y la mezcla de ambos abonos (AO-AV). Para cuantificar la disponibilidad del P, se empleó el modelo de adsorción de Freundlich. De esta manera se evidenció una disminución en la cantidad del nutriente adsorbido en el suelo con el sistema NPK-SN-AV, además de promover la disponibilidad del fósforo fisiadsorbido, reduciendo significativamente la cantidad de fertilizante que se requiere para alcanzar los requerimientos externos de P en los cultivos. Adicionalmente, se estudió la influencia del AO sobre los sitios de adsorción en el sustrato, pudiendo ser él mismo un nuevo agente adsorbente del nutriente en estudio.

Palabras Clave: Fósforo, isotermas de adsorción de Freundlich, enmiendas agroecológicas, suelos de sabana

EVALUATION OF THE PHOSPHORUS ADSORPTION ASSOCIATED TO AGROECOLOGICAL MANAGEMENT IN SOILS OF THE AMAZONAS STATE USING FREUNDLICH ISOTHERMS

ABSTRACT

An experimental design was used to study the changes of phosphorus adsorption in soils located northwest of Amazonas state, to assess their availability of different agroecological amendments. Additionally, four systems were studied: natural savanna (SN), organic manure (AO), green manure (AV) and both fertilizers (AO-AV). The adsorption isotherms were fitted to Freundlich model, showing a decrease in the amount of adsorbed phosphorus with NPK-SN-AV system, and promote the availability of phosphorus physisorbed. Therefore, this combining reduces significantly the fertilizer amount necessary to reach external phosphorus requirements for most of crops. Additionally, the influence of organic fertilizer on the adsorption sites was studied in the substrate, by itself could be a new adsorbent of the nutrient under study.

Keywords: Phosphorus, Freundlich adsorption isotherm, agroecological amendments, savanna soil

INTRODUCCIÓN

Las sabanas del norte de Sudamérica se han visto sometidas a un manejo agropecuario extensivo originado por su baja fertilidad natural, requiriendo la aplicación de dosis significativas de fertilizantes para obtener rendimientos aceptables (López-Hernández y Ojeda, 1996; López-Hernández, Hernández-Hernández y Brossard, 2005;

Hernández-Hernández, 2008). En Venezuela, desde los años 70's se practicó una agricultura intensiva en la región de ultisoles arenosos, en sabanas del noreste del país caracterizados por un intenso laboreo y uso inadecuado de agroquímicos, lo que provocó un acelerado deterioro de los mismos (Casanova, 2003). De allí la necesidad de promover cambios en las prácticas de manejo que involucren distintas opciones de labranza e incorporación

de biomasa que alteren la dinámica de retorno de la materia orgánica y su influencia en el suministro de nutrientes disponibles. En este sentido, se han empleado las isotermas de adsorción para cuantificar el contenido de nutrientes en el suelo, estimando la cantidad que debe incorporarse de los mismos para satisfacer los requerimientos de la planta (Goen y Suprihanto, 1995; Dubus y Becquer, 2001; Shafqat y Pierzynski, 2014; Guedes *et al.*, 2016). Así mismo, se han realizado diversos estudios relacionados con la adsorción del fósforo (Goen y Suprihanto, 1995; Van Der Salm, Krosa y De Vries, 2016); la competencia por los sitios de adsorción frente a compuestos como, malatos y oxalatos (López-Hernández, Siegert y Rodríguez, 1986; Scharifker y Zelenay, 1988; Espinoza, 2004) y los efectos de una combinación de fuentes orgánicas junto a nutrientes inorgánicos para determinar su influencia en la capacidad de adsorción del fósforo en el suelo (Nziguheba, Palm, Buresh y Smithson, 1998).

Siguiendo este orden de ideas, el presente trabajo evalúa el cambio en la adsorción de fósforo asociado a las distintas alternativas de manejo agroecológico del suelo, en sabanas ubicadas al norte del estado Amazonas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño experimental se llevó a cabo en dos etapas: (1) ensayo de campo y (2) análisis fisicoquímicos de los suelos estudiados.

Diseño experimental de campo

El muestreo y aplicación de enmiendas se realizó en la Agropecuaria San Diego, ubicada al noroeste del estado Amazonas (Figura 1), aplicándose los siguientes tratamientos: NPK (14-14-14), roca fosfórica (RF) y control (C, sin fertilizantes inorgánicos); además de las enmiendas: abono orgánico (AO), abono verde (AV) y la mezcla de ambos abonos (AO + AV), tomando el sistema sabana natural (SN) como referencia (Figura 2). Cada una de las parcelas fue sembrada con *Vigna unguiculata* Var *Tuy* (Frijol bayo). Las muestras de suelo fueron tomadas luego de 40 días de haber aplicado los tratamientos. Se recolectaron con un barreno entre 0 y 20 cm de profundidad, por triplicado y de manera aleatoria en cada parcela, para luego ser homogeneizadas y cuarteadas. Finalmente, las muestras fueron secadas al aire libre y tamizadas.

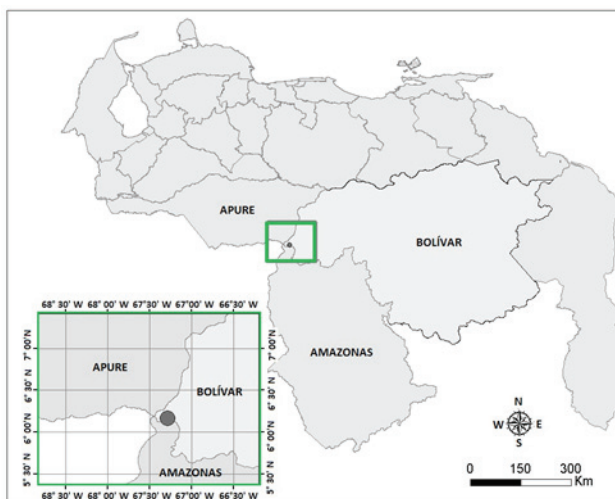


Figura 1. Ubicación de la zona de muestreo.
Coordenadas: 06° 10' latitud N y 67° 17' longitud W

A continuación, se describen las principales características de los tratamientos aplicados en el suelo:

Abono verde. Se empleó la gramínea víbora (*Imperata contracta*), reconocida por ser colonizadora en ecosistemas de bosques y por su bajo contenido de fósforo.

Abono orgánico. Consistió en la colecta de excretas de ocho novillos que fueron alimentados durante cinco días con una mezcla de 5 kg de roca fosfórica molida, en 20 kg de pasto tiftón o bermuda de la costa (*Cynodon dactylon*).

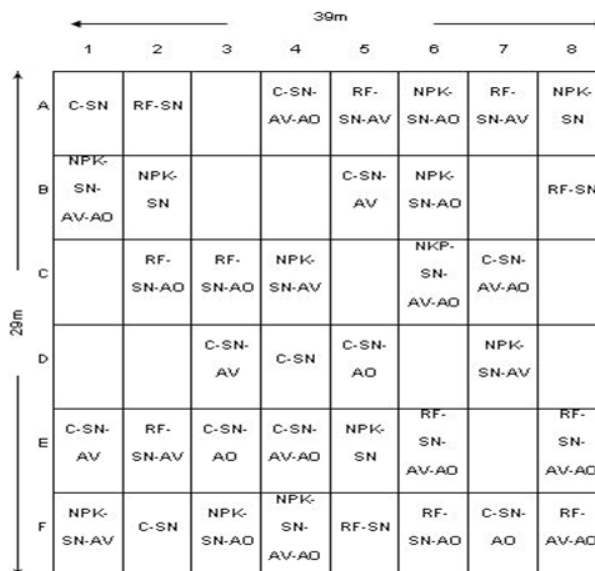


Figura 2. Ubicación espacial de los tratamientos implementados

Tabla 1. Dosis aplicadas en el suelo para cada tratamiento

Tratamiento	NPK, g	AO (Origen animal), g	AV (<i>Imperata contracta</i>), kg	RF, g	Nitrógeno (NH ₄ NO ₃), g	Potasio (KCl), g
NPK-AO	320	720	0	0	0	0
NPK-AV	320	0	12	0	0	0
NPK-AO-AV	320	360	6	0	0	0
NPK-SN	320	0	0	0	0	0
RF-AO	0	720	0	240	136	76
RF-AV	0	0	12	240	136	76
RF-AV-AO	0	360	6	240	136	76
RF-SN	0	0	0	240	136	76
C-AO	0	720	0	0	136	76
C-AV	0	0	12	0	136	76
C-AV-AO	0	360	6	0	136	76
C-SN	0	0	0	0	136	76

Abonos inorgánicos. Se utilizaron dos fertilizantes químicos: (i) NPK, compuesto por 14,0% de nitrógeno total (N); 14,0% de fósforo asimilable (P₂O₅); 14,0% de potasio soluble en agua (K₂O) y (ii) roca fosfórica. Empleándose cantidades equivalentes de NH₄OH y KCl en los sistemas con RF y control, a fin de mantener la semejanza con los tratamientos de NPK (Tabla 1).

Identificación de las fases minerales del suelo

La identificación de las fases minerales presentes en el suelo se realizó por Difracción de Rayos-X (DRX), tomando la muestra del sistema Sabana Natural. Se empleó un equipo Siemens D-5000, equipado con un ánodo de Cu ($k\alpha$, $\lambda = 1,954$).

Estudio fisicoquímico

En lo referente a la cinética de adsorción del fósforo, se procedió a medir la conductancia específica de una solución de K₂HPO₄-KCl (relación 9:1) con 5 g de suelo (60 mesh), hasta alcanzar el estado de equilibrio. Este estudio se realizó empleando un conductímetro Amber Sciences, modelo 3082, con corrección de temperatura. Adicionalmente, se construyeron las isothermas de adsorción de fósforo para cada muestra de suelo y se linealizaron empleando el modelo de Freundlich, según la ecuación:

$$\log(x/m) = \log(a) + b \cdot \log(c) \quad (1)$$

donde x/m se refiere a la cantidad de fósforo adsorbido en el equilibrio por gramo de suelo ($\mu\text{g g}^{-1}$) y c representa la concentración de fósforo en el equilibrio (ppm), pudiendo

determinarse la afinidad ($1/b$) y la capacidad relativa de adsorción (a). La determinación del contenido de fósforo en todos los ensayos se realizó según la metodología de Murphy y Riley, modificada por Watanabe y Olsen (Robertson, Coleman, Bledsoe y Sollins, 1999). Finalmente, con el objeto de evaluar la disponibilidad del fósforo en el suelo, se llevó a cabo un estudio de desorción. Para ello, se colocó un gramo de suelo en 10 mL de una solución de KCl (0,1 M) que fue sonicada por 20 minutos.

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos a partir de las isothermas de adsorción, fueron tratados por un análisis de regresión lineal. En el estudio de desorción se practicó un ANOVA de dos vías, mostrando que los valores obtenidos eran diferentes entre sí.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El resultado por DRX correspondiente a la muestra Sabana Natural se presenta en la Figura 3. La misma fue sometida a un proceso de separación que consistió en tamizarla (60 mesh) para luego ser sometida a ultrasonido. Esto se realizó con el objeto de analizar la fase activa, correspondiente a la fracción de arcillas ($< 1/256$ mm). El patrón de difracción muestra la presencia de los minerales secundarios: cuarzo (SiO₂), gibbsita (Al(OH)₃) y dickita (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O), característicos de suelos bien drenados, antiguos y altamente meteorizados que se forman cuando el material parental se encuentra en su último estado de intemperización, lo cual es típico de la zona estudiada (García Montero, 1994).

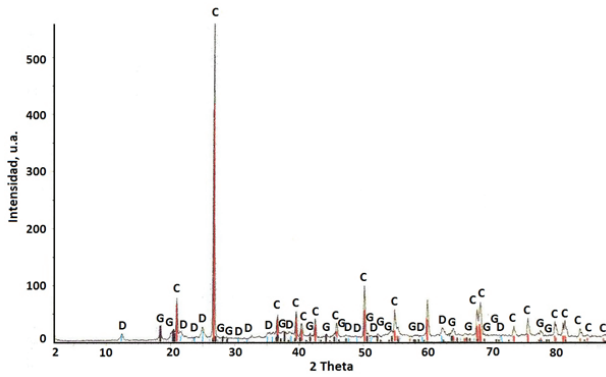


Figura 3. Difractograma para la nuestra Control – Sabana Natural. C: Cuarzo, D: Dickita, G: Gibbsita

En cuanto a los estudios de adsorción, se requirió conocer el tiempo necesario para alcanzar las condiciones de equilibrio sobre el sustrato. La Figura 4 muestra la cinética de adsorción del fósforo para el suelo de la muestra Sabana Natural empleada como referencia. A partir de esta experiencia se obtuvo un tiempo de equilibrio de 1500 minutos, el cual fue empleado para realizar la construcción de las isoterma de adsorción. Es de hacer notar que estos tiempos de adsorción dependen del tipo de suelo en estudio, pudiendo establecerse desde 1 hasta 6 días (Fox y Kamprath, 1970).

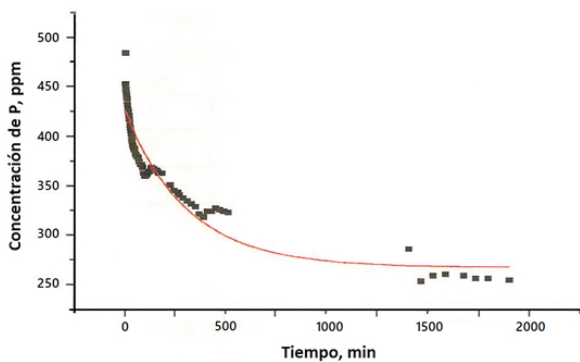


Figura 4. Cinética de adsorción del fósforo sobre la muestra Sabana Natural

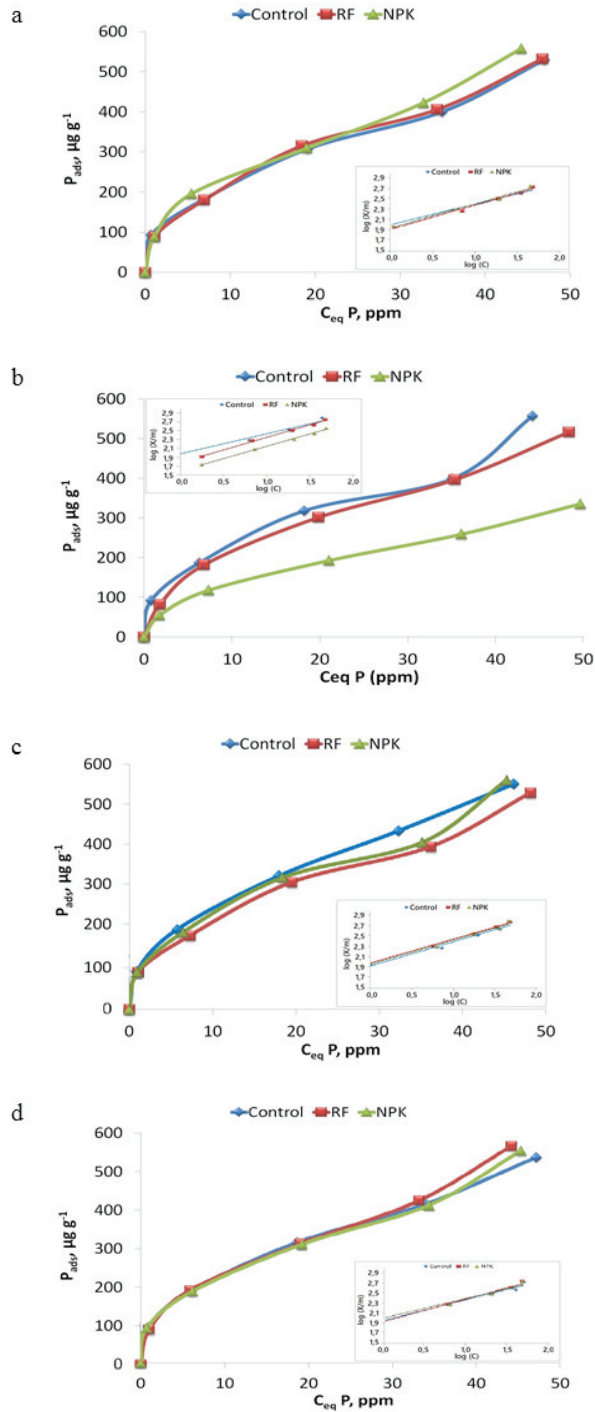


Figura 5. Isotherma de adsorción de fósforo y linealización de Freundlich obtenidas para los sistemas:

(a) Sabana Natural (SN), (b) Sabana Natural (SN) - Abono Verde (AV), (c) Sabana Natural (SN) - Abono Orgánico (AO) y (d) Sabana Natural (SN) - Abono Verde - Abono Orgánico (AV-AO).

En las Figuras 5a-d se muestran las isotermas de adsorción de fósforo con los tratamientos descritos. Se graficó la cantidad de fósforo adsorbido (μg) por gramo de suelo vs. la concentración del elemento en el equilibrio (C_{eq} de fósforo). En el recuadro, puede apreciarse la linealización de las isotermas, empleando la ecuación de Freundlich. La Figura 5-a presenta las isotermas asociadas a la muestra de Sabana Natural, con el control y las enmiendas en estudio. Las mismas presentan una tendencia semejante entre sí; sin embargo, al incorporar el abono verde en el suelo de sabana (Figura 5-b) se aprecia una disminución importante en la adsorción de fósforo cuando se utiliza el NPK. En la literatura se señala que estas enmiendas modifican la solubilidad de muchas especies del suelo, reduciendo en cierto grado la acidez al favorecer la fijación de aluminio y la retención de humedad, lo cual propicia la solubilización del fertilizante (NPK). Este resultado coincide con los obtenidos en trabajos anteriores (Nziguheba, Palm, Buresh y Smithson, 1998), donde se evaluó el efecto de las fuentes orgánicas de fósforo en el suelo ubicado al oeste de Kenya, combinando superfosfato triple (SFT) con *Tithonia diversifolia*. Los autores observaron una disminución en la capacidad de adsorción del fósforo en el suelo, debido a la competencia existente entre el fosfato y los aniones orgánicos por los sitios de adsorción, producidos durante la descomposición de la materia orgánica.

Por otro lado, al observar las Figuras 5-c y 5-d, que contienen abono orgánico incorporado al suelo, no se muestran diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. Esto puede deberse a que al encontrarse una gran cantidad de materia orgánica, se induzca una adsorción adicional del fósforo sobre ésta. Así se lograría obtener un doble papel de la materia orgánica, contribuyendo a bloquear los sitios de adsorción en la superficie de partículas inorgánicas, como arcillas y óxidos metálicos, además de contribuir en su adsorción. Esta observación ha sido reportada por otros investigadores (Singh y Jones, 1976), quienes demostraron que existe un límite para la cantidad de fósforo en las enmiendas orgánicas de $\sim 0,3\%$, por debajo del cual aumenta la adsorción y disminuye la labilidad de la especie química.

Ahora bien, los valores obtenidos con el modelo de Freundlich, presentados en la Tabla 2, fueron procesados estadísticamente (95% de confianza), con un coeficiente de regresión lineal superior a 0,97. En el caso de la Sabana Natural, puede apreciarse que tanto la afinidad del fósforo ($1/b$) por la superficie del coloide, como la capacidad relativa de adsorción (a) resultan ligeramente superiores para el Control. Esto muestra que las enmiendas implementadas bloquearon posibles sitios de adsorción en el suelo y

por ende, disminuyeron la capacidad de adsorción del elemento en el sustrato. Al incorporar el AV, se aprecia una diferenciación significativa al evaluar las distintas fuentes de fósforo, siendo más marcada en el sistema NPK-SN-AV. Es importante recordar que la roca fosfórica es un mineral que se solubiliza más lentamente que el abono inorgánico, aportando en menor medida el elemento de estudio al suelo tratado. Contrario a estos hechos, se observa que al agregar AO al suelo la tendencia es a aumentar la capacidad relativa de adsorción del fósforo, siendo más relevante para el sistema NPK-SN-AV-AO. Esto es atribuido al efecto dual que presenta la materia orgánica, donde se favorece un bloqueo de los sitios de adsorción en la superficie de la fracción coloidal, lo cual se aprecia en la muestra Control; también puede contribuir en su adsorción, siendo mayor este comportamiento, en la medida en que se cuenta con una mayor cantidad de fósforo soluble en el medio.

Tabla 2. Valores obtenidos de las isotermas de adsorción ajustadas al modelo de Freundlich

Tratamiento	Recta de correlación	a ($\mu\text{g g}^{-1}$)	1/b (ppm^{-1})
Sabana natural			
Control	$y = 0,3964x + 1,9997$	$99,9 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,1$
Roca fosfórica	$y = 0,4650x + 1,9115$	$81,6 \pm 0,1$	$2,12 \pm 0,08$
NPK	$y = 0,4655x + 1,9375$	$86,6 \pm 0,1$	$2,15 \pm 0,08$
SN-Abono verde			
Control	$y = 0,4281x + 1,9751$	$94,4 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,1$
Roca fosfórica	$y = 0,5387x + 1,7875$	$61,3 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,1$
NPK	$y = 0,5271x + 1,6072$	$40,5 \pm 0,1$	$1,9 \pm 0,1$
SN-Abono orgánico			
Control	$y = 0,4449x + 1,9238$	$83,9 \pm 0,1$	$2,2 \pm 0,1$
Roca fosfórica	$y = 0,4375x + 1,9817$	$95,9 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,1$
NPK	$y = 0,4421x + 1,9565$	$90,5 \pm 0,2$	$2,3 \pm 0,1$
SN-Abono verde-Abono orgánico			
Control	$y = 0,4245x + 1,9649$	$92,2 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,1$
Roca fosfórica	$y = 0,4652x + 1,9406$	$87,2 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,1$
NPK	$y = 0,4036x + 2,0118$	$102,8 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,1$

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos en el estudio de desorción, donde se evaluó si los tratamientos aplicados promueven la formación de enlaces tipo van der Waals entre el adsorbato y el sustrato, aumentando así la cantidad de fósforo fisiadsorbido.

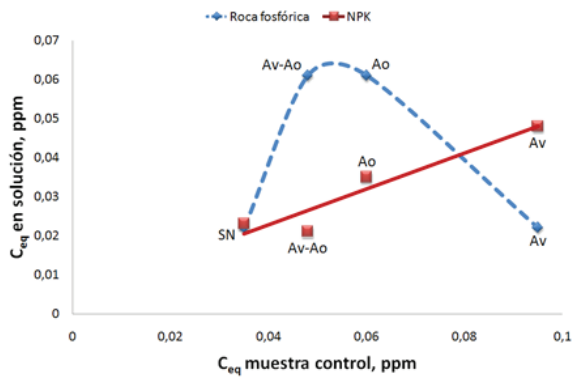


Figura 6. Relación entre los distintos tratamientos en cuanto a la labilidad del fósforo

Por lo antes expuesto, puede afirmarse que al combinar el abono verde con el NPK se obtiene una disminución importante en la capacidad de adsorción del fósforo en el suelo, aumentando además la cantidad del elemento fisisorbido y por ende, disponible para la planta. Lo que indica que la especie se encuentra débilmente unida al sustrato y, por ende, puede desprenderse de la superficie de adsorción con cierta facilidad, aumentando su movilidad y disponibilidad para la planta. En este sentido, Myers y col. (Myers *et al.*, 1994) reportaron que al evaluar la dinámica de las fracciones de fósforo disponibles en un Ultisol de sabana tratado con distintos abonos verdes, se incrementó la cantidad de fósforo disponible y potencialmente mineralizable.

Así, en la Figura 7-a se muestran las diferentes isotermas de adsorción obtenidas al combinar el NPK con las enmiendas estudiadas. Según lo reportado en la literatura (Fox y Kamprath, 1970; Laidler, 1987), la cantidad de fósforo que requieren las plantas para su desarrollo es de 0,2 ppm. En función de ello, se realizó una ampliación de la gráfica (Figura 7-b) a fin de determinar la cantidad de fósforo por gramo de suelo necesaria para obtener la mencionada concentración en el equilibrio.

Puede apreciarse como al combinar el NPK con el AV la reducción en la cantidad de fertilizante y por ende en el costo se ve reducido significativamente. Debido a que en la muestra Sabana Natural se requiere de 588,2 kg de NPK por hectárea lo que equivale a unos 367,00 Bs., mientras para la fuente combinada solo se necesitan 147,1 kg que corresponde a Bs. 92,00. Mostrando la rentabilidad de la aplicación de la enmienda en los suelos de sabana.

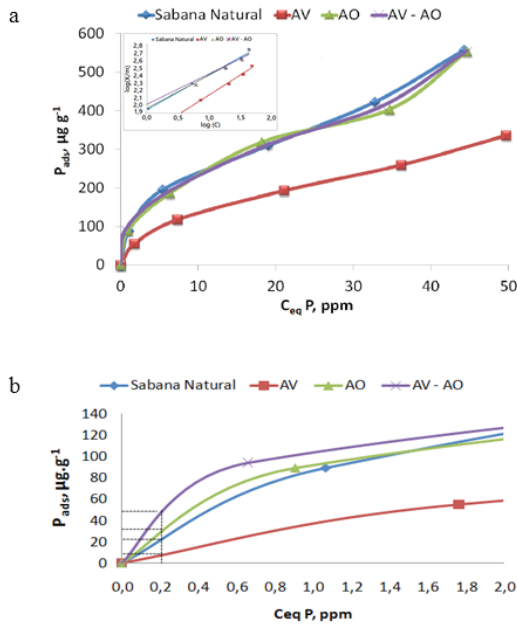


Figura 7. (a) Isoterma de adsorción de P en los suelos tratados con NPK. (b) Intervalo de 0-2 ppm

Estableciendo de esta manera, la rentabilidad de los tratamientos implementados relacionados con la concentración de fósforo requerida por hectárea de suelo (Tabla 3).

Tabla 3. Costo de NPK (14-14-14) requerido para obtener una concentración de 0,2 ppm de P en el equilibrio.

$\mu\text{g P/g}$ suelo	kg P/ha suelo*	kg NPK/ha	Cantidad de sacos/ha**	Costo, Bs/ha***
5	12	147	3	92
10	25	294	6	184
20	50	588	12	367
40	100	1177	24	734
80	200	2353	47	1469
100	250	2941	59	1836

* Considerando que 1ha requiere $2,5 \times 10^6$ kg.

** 50 kg de fertilizante/saco.

***Precio oficial del fertilizante: 31,21 Bs./saco.

CONCLUSIONES

En el suelo de la Sabana Natural se identificaron minerales secundarios como gibbsita y dickita, característicos de zonas bien drenadas y antiguas, con un alto grado de meteorización, típicos de la región en estudio. De todas las enmiendas estudiadas para promover la disponibilidad del fósforo a ser captado por la planta, se obtuvo como combinación óptima el sistema NPK-SN-Abono verde, reduciendo en una

proporción de 1/3 la cantidad de fertilizante requerido del nutriente para alcanzar los requerimientos externos en la mayoría de los cultivos. La incorporación de una cobertura que fomente una mayor retención de humedad, para estos suelos de textura arenosa, de baja fertilidad y bajo contenido de materia orgánica, propicia mejores condiciones para la germinación, crecimiento y desarrollo del cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por el FONACIT (antiguo CONICIT) a través del Proyecto Nro. 2000000600, dirigido por el Prof. Alonso Ojeda.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASANOVA, E. (2003). Agricultura sostenible y fertilidad de suelos. *Revista UNELLEZ de Ciencia y Tecnología*, 21, 18-35.
- DUBUS, I.G. Y BECQUER, T. (2001). Phosphorus sorption and desorption in oxide-rich ferasols of New Caledonia. *Australian Journal of Soil Research*, 39, 403-414.
- ESPIÑOZA, Y. (2004). Calidad de la materia orgánica bajo diferentes prácticas de manejo en un suelo ácido tropical. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 21, 126-140.
- FOX, R.L. Y KAMPRATH, E.I. (1970). Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 34, 902-907.
- GARCÍA MONTERO, P.G. (1994). Los suelos del estado Amazonas: sus potencialidades agrícolas. *Venezuelos*, 2(2), 59-66.
- GOEN, HO. Y SUPRIHANTO, N. (1995). Phosphorus movement through soils and groundwater: application of a time-dependent sorption model. *Water Science & Technology*, 31, 83-90.
- GUEDES, R.S, MELO, L.C.A., VERGÜTZ, L., RODRÍGUEZ-VILA, A., COVELO, E.F., FERNANDES, AR. (2016). Adsorption and desorption kinetics and phosphorus hysteresis in highly weathered soil by stirred flow chambre experiments. *Soil & Tillage Research*, 162, 46-54.
- HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, R.M. (2008). Dinámica y manejo de la materia orgánica en suelos de sabanas bien drenadas. *Acta Biologica Venezuelica*, 28(1), 69-84.
- LAIDLER, K. (1987). *Chemical Kinetics*. (Harper & Row. Publishers). New York (USA). Tercera Edición.
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D., HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, R.M. Y BROSSARD, M. (2005). Historia del uso reciente de tierras de las sabanas de América del Sur: Estudios de casos en sabanas del Orinoco. *Interciencia*, 30(10), 623-630.
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D., SIEGERT, G. Y RODRÍGUEZ, J.V. (1986). Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50, 1460-1462.
- LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D. Y OJEDA, A. (1996). Alternativas en el manejo agroecológico de los suelos de las sabanas del norte de Suramérica. *Ecotrópicos*, 9(2), 101-117.
- MYERS, R., PALM, C., CUEVAS, E., GUNATILLEKE, I. Y BROSSARD, M. (1994). *The biological management of tropical soil fertility*. Wiley-Sayce Publication. UK.
- NZIGUHEBA, G., PALM, C.A., BURESH, R.J. Y SMITHSON, P.C. (1998). Soil Phosphorus Fractions and Adsorption as Affected by Organic and Inorganic Sources. *Plant and Soil*, 198, 159-168.
- ROBERTSON, G.P., COLEMAN, D.C., BLEDSOE, C.S. Y SOLLINS, P. (1999). *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. Oxford. Oxford University Press. New York.
- SHAFQAT, M.N. Y PIERZYNSKI, G.M. (2014). The Freundlich adsorption isotherm constants and prediction of phosphorus bioavailability as affected by different phosphorus sources in two Kansas soils. *Chemosphere*, 99, 72–80.
- SCHARIFKER, B.R. Y ZELENAY P. (1988) The comparison of thermodynamic quantities in adsorption from solution described by different isotherms. *Acta Científica Venezolana*. 39, 315-318.
- SINGH, B.B. Y JONES, J.P. (1976) Phosphorus sorption and desorption characteristics of soil as affected by organic residues. *Soil Science Society of America Journal*, 40, 389-394.
- VAN DER SALM, C., KROSA, J., DE VRIES, W. (2016). Evaluation of different approaches to describe the sorption and desorption of phosphorus in soils on experimental data. *Science of the Total Environment*, 571, 292–306.

