

## **EVALUACIÓN DE LA FERTILIDAD FOSFÓRICA EN DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN UBICADOS EN SABANAS BIEN DRENADAS DE VENEZUELA A TRAVÉS DE TÉCNICAS DE FRACCIONAMIENTO**

### **ASSESSMENT OF PHOSPHORIC FERTILITY IN DIFFERENT PRODUCTION SYSTEMS IN WELL DRAINED SAVANNAS THROUGH FRACTIONING TECHNIQUES**

*Ismael Hernández Valencia*

Instituto de Zoología Tropical. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela

#### **RESUMEN**

En suelos con bajos contenidos de P, como los que se encuentran en las sabanas bien drenadas, el ciclaje de P más que el contenido de la fracción disponible, puede determinar la productividad vegetal. Por esta razón, las técnicas de fraccionamiento de P pueden ser útiles para la caracterización de la fertilidad fosfórica de un suelo, ya que permiten estimar la fracción considerada de disponibilidad inmediata por los métodos de rutina, así como otras fracciones que pueden estar a disposición en diferentes plazos. Adicionalmente, las técnicas de fraccionamiento también pueden ser útiles para establecer la sostenibilidad de las prácticas agrícolas y forestales, a través de los cambios que se producen en las diferentes fracciones de P del suelo con el establecimiento de dichos sistemas. En el presente trabajo se presenta una evaluación de diferentes sistemas de producción agrícolas y forestales establecidos en sabanas con suelos bien drenados a través de las técnicas de fraccionamiento de P en el suelo y se discute sobre la consecuencia de estos cambios en la fertilidad fosfórica y la sostenibilidad de los sistemas de producción.

#### **ABSTRACT**

In low content P soils found in well drained savannas, P cycling more than P availability can determine plant productivity. For this reason, P fractionation techniques can be useful to characterize soil phosphoric fertility, because they permit estimating the fraction considered available by routine methods, as well as others forms available in different tiems. Additionally, P fractionation techniques can also be useful in determining the sustainability of agricultural and forestry practices, through the changes produced by those managements in soils. In this paper an evaluation of different agricultural and forestry systems established in savannas with well drained soils is presented using P fractionation techniques as well as a discussion of the consequences of these changes over phosphoric fertility and the sustainability of those systems.

**Palabras clave:** fraccionamiento de P, sabanas bien drenadas, sostenibilidad  
**Key words:** P fractionation, well drained savannas, sustainability

## **INTRODUCCIÓN**

Las sabanas bien drenadas se encuentran ampliamente distribuidas en los llanos venezolanos, en donde ocupan una extensión aproximada de 130.000 km<sup>2</sup> (Berroterán, 2000). Estas sabanas están asociadas a suelos ácidos, con bajos contenidos de nutrientes esenciales, alta saturación de aluminio intercambiable debido a su

acidez, y en algunos casos baja capacidad de almacenamiento de agua y la presencia de una coraza laterítica que dificulta el desarrollo de las raíces. La naturaleza distrófica de los suelos de las sabanas venezolanas bien drenadas son una consecuencia de la presencia de materiales parentales ricos en sílice, con bajo contenido nutricional y/o procesos pedogenéticos como la fuerte meteorización, que han favorecido la

pérdida de nutrimentos esenciales y la acumulación de minerales primarios resistentes (ej. cuarzo), y de sexquióxidos y arcillas con baja actividad de intercambio.

Pese a las limitaciones edáficas, las sabanas bien drenadas constituyen importantes polos de desarrollo agrícola y económico del país, en donde se han establecido variados sistemas de producción, que van desde la agricultura de subsistencia hasta sistemas intensivos de producción agrícola vegetal, pecuario y forestal. Sin embargo, la creciente demanda de alimentos junto con incorporación de tierras con menor potencial productivo y de prácticas agrícolas no adaptadas a nuestras condiciones ecológicas, han procurado la degradación de extensas áreas de suelos de sabanas bien drenadas (López-Hernández y col., 2005). Esta situación justifica una evaluación de los sistemas de producción existentes, así como la implementación de manejos que procuren una mejor conservación de la calidad del suelo, destacando especialmente la fertilidad química, en virtud de las fuertes limitaciones nutricionales que presentan estos ecosistemas.

El fósforo es considerado uno de los principales elementos que limita la producción agrícola en las sabanas, debido a las bajas concentraciones que usualmente presentan los suelos en relación a los requerimientos de las plantas de cultivo. Estas bajas concentraciones de P se deben a que en condiciones de suelos ácidos, se favorece la formación de compuestos insolubles de fósforo asociados al hierro, aluminio y manganeso, que no pueden ser utilizados por las plantas. Si bien la fertilización inorgánica puede resolver estas deficiencias; para un mismo cultivo, los aportes de fertilizantes fosforados en suelos ácidos suelen ser mayores, debido a la gran capacidad de fijación de P que tienen estos suelos. Es por ello que el manejo de la fertilidad fosfórica en suelos ácidos constituye un campo de investigación de interés en el logro de sistemas de producción sostenibles.

### Formas de fósforo en el suelo

El fósforo en el suelo se puede encontrar como constituyente de compuestos orgánicos e inorgánicos. Los compuestos de fósforo orgánico

(Po) son producto de la degradación y síntesis de los residuos biológicos que son incorporados al suelo, siendo los más comunes los ésteres fosfatos como el inositol fosfato, ácidos nucleicos, fosfolípidos y el P asociado a compuestos carbonados más estables como los ácidos húmicos y fúlvicos (Bowman y Cole, 1978). Estos compuestos orgánicos pueden ser mineralizados por los microorganismos y enzimas del suelo para producir P asimilable por las plantas, o bien pueden estar adsorbidos u ocluidos dentro de la matriz mineral del suelo, lo que le confiere protección al ataque microbiano. Por su parte, el fósforo inorgánico (Pi) está contenido en los minerales primarios, así como en variadas especies químicas producto de las transformaciones que estos sufren. La mayor parte de los compuestos inorgánicos de P en el suelo se ubican en dos grupos: a) los que contienen calcio y b) los que contienen aluminio, hierro y menos frecuentemente manganeso. Los primeros son más comunes en suelos alcalinos y tienden a disolverse y disminuir su contenido en la medida que los suelos se hacen más ácidos. Ejemplo de ellos son los minerales tipo apatita, como la fluoroapatita, oxiapatita e hidroxiapatita y los fosfatos simples de calcio. En contraste, en condiciones ácidas, aumenta la solubilidad del hierro y el aluminio y la formación de sexquióxidos de Fe y Al que son muy abundantes en suelos muy meteorizados, así como compuestos estables como la variscita, estrengita y goetita, que son poco solubles en condiciones ácidas.

De todas las formas de P en el suelo, las plantas solo son capaces de absorber formas inorgánicas solubles que se encuentran en la solución del suelo o débilmente adsorbidas a la matriz sólida del suelo, principalmente como aniones fosfatos  $\text{HPO}_4^{2-}$  y  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Esta fracción es conocida como el fósforo disponible del suelo. Tiessen y Moir (1993) sintetizaron las dificultades metodológicas y operacionales de la determinación del P disponible, y señalaron que bajo un contexto agronómico los métodos existentes no miden el total del P disponible para las plantas, aunque si una porción del mismo que se relaciona con esta fracción. Usualmente estas relaciones son establecidas a través de ecuaciones de regresión que vinculan la producción y/o incorporación de P por las planta de acuerdo a diferentes

concentraciones de P en el suelo, o bien, la deficiencia de P expresada como requerimiento potencial de fertilizantes por un cultivo. Sin embargo, estas relaciones no se mantienen cuando se examinan las respuestas para las plantas perennes y ecosistemas naturales con bajos contenidos de P disponible, en donde el ciclaje de P, más que el contenido de la fracción disponible, determina la productividad vegetal. Adicionalmente, los autores sugieren que la disponibilidad de fósforo en el suelo debería ser definida de acuerdo al tipo de planta, comunidad vegetal o cultivo, ya que estos difieren en sus requerimientos por las características de sus sistemas de raíces, asociaciones con microorganismos (p.e. micorrizas) y tasas de crecimiento. Ya que las plantas obtienen el P a través de las raíces y de los simbiontes asociados a estas, el fósforo disponible está compuesto por el P en solución, más el que se incorpora a la solución en un período determinado, a través de procesos de solubilización, desorción y mineralización. Por esta razón, Tiessen y Moir (1993) concluyen que el contenido de P disponible es un concepto funcional, más que una cantidad medible y que no existe un método directo y simple para su estimación.

En vista que las limitaciones metodológicas para la determinación de P disponible, las técnicas de fraccionamiento de P pueden ser muy útiles para la caracterización de la fertilidad fosfórica de un suelo, ya que no solo permiten estimar la fracción considerada “disponible”, sino también otras fracciones que pueden estar a disposición de las plantas en el corto y mediano plazo.

### **Algunas técnicas de fraccionamiento para la caracterización del P del suelo**

Para caracterizar la variedad de formas de P en el suelo se han propuestos varios esquemas de fraccionamiento, que tienen en común el uso de una secuencia de extractantes que van desde los más suaves para extraer las formas solubles, débilmente adsorbidas o fácilmente mineralizables (formas lábiles) hasta reactivos más fuertes que finalmente extraen las formas más estables (formas recalcitrantes). Estas fracciones extraídas corresponden a formas químicas, que de acuerdo a

su estabilidad y facilidad de extracción podrían relacionarse con su capacidad para ser transformadas en formas disponibles para las plantas.

Chang y Jackson (1957) desarrollaron un método secuencial de fraccionamiento que fue modificado posteriormente por Williams y col. (1967). En el mismo, el suelo es tratado inicialmente con  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (1,0N) para extraer las formas lábiles de P, seguido de una extracción con  $\text{NH}_4\text{F}$  (0,5N) para disolver los compuestos asociados al aluminio y luego  $\text{NaOH}$  (0,1N) para extraer los compuestos de Fe. Le siguen una extracción con ditionito-citrato para las formas ocluidas de P y posteriormente  $\text{HCl}$  (0,5N) para disolverlas formas de Ca. Finalmente, el residuo que queda de las extracciones previas es fundido en  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para determinar el P remanente. En cada una de las fracciones obtenidas se puede determinar la fracción orgánica por diferencia entre el  $\text{P}_i$  extraído con un ácido diluido, después que la muestra es sometida a ignición (Saunders y Williams, 1955). Entre los cuestionamientos a este procedimiento se encuentran: a) que la extracción de las fracciones de  $\text{P}_i\text{-Al}$  y  $\text{P}_i\text{-Fe}$  no son confiables, ya que no existe una separación adecuada de los mismos a pH 7 (Yuan y col., 1960) y b) que la fracción de  $\text{P}_i\text{-ocluido}$  está pobremente definida (Williams y Walker, 1969), aunque ha sido muy útil para evaluar los efectos producidos por la adición de rocas fosfóricas, por los cambios que se evidencian en la fracción extraíble con  $\text{HCl}$  (Hongquin y col., 2001).

Bowman y Cole (1976) propusieron un método de fraccionamiento para discriminar exclusivamente las fracciones de  $\text{P}_o$ . En este método se diferencian 4 fracciones que son extraídas secuencialmente de acuerdo al siguiente orden: a) una fracción lábil obtenida a través de un extractante suave ( $\text{NaHCO}_3$  0,5M), b) una fracción moderadamente lábil, obtenida a través de la diferencia entre las fracciones obtenidas en una extracción ácida ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  1,0M), menos la fracción lábil previamente extraída, c) una fracción moderadamente resistente constituida por  $\text{P}_o$  asociada a los ácidos fúlvicos, el cual es extraído con un álcali ( $\text{NaOH}$  0,5M) y posterior precipitación de los ácidos húmicos con un ácido y

d) una fracción altamente resistente soluble en álcali (NaOH 0,5M), pero insoluble en ácido asociada al Po en los ácidos húmicos. Entre las observaciones realizadas a este método se encuentran que las fracciones lábiles y moderadamente lábiles no son claramente identificadas en cuanto a las especies químicas del Po del suelo que la componen. Para el caso de la fracción lábil, los autores indican que este compartimiento está compuesto por la cantidad de P con ciertos extractantes suaves, o bien, la cantidad de P liberado por ciertas enzimas hidrolíticas como las fosfatasa. Otra limitación del método, es que no extrae la fracción de fitatos, lo cual lleva a una subestimación del Po total del suelo.

En la actualidad, uno de los procedimientos de fraccionamientos más populares es el esquema propuesto por Hedley y col. (1982), el cual permite discriminar formas orgánicas e inorgánicas de P en el suelo (Cuadro 1). Inicialmente las formas lábiles de Pi constituido por el Pi intercambiable (Pi-resina) y por el Pi adsorbido débilmente a la matriz sólida del suelo (Pi-NaHCO<sub>3</sub> 0,5M). A ellas se suma el Po lábil (Po-NaHCO<sub>3</sub> 0,5M), conformado por Po fácilmente mineralizable que contribuye al Pi disponible (Bowman y Cole, 1976). Las formas más estables de P son extraídas seguidamente con un álcali (P-NaOH 0,1M), aunque hay que destacar que la fracción inorgánica obtenida en este paso no es un compartimiento completamente separado de la fracción extraíble con bicarbonato, sino más bien un continuo de compuestos de aluminio y hierro asociados al P (Tiessen y Moir, 1993). Le sigue una extracción con ácido diluido (HCl 1M), que es quizás una de las fracciones más claramente definidas y corresponde al P asociado al calcio, entre ellos minerales del tipo apatita. Finalmente, el residuo que es tratado con una digestión de ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno concentrados, contiene las formas más estables de Po y Pi. De acuerdo a Tiessen y Moir (1993), el método original deja en la fracción residual entre un 20-60% del Po total, el cual puede ser una cantidad significativa que puede contribuir en las transformaciones a corto plazo, y por esta razón incorporaron la adición de HCl concentrado y caliente posterior a la extracción con HCl 1M, con el fin de extraer el Po remanente, que consiste

principalmente en Po asociado a la materia orgánica particulada que no es fácilmente extraída en álcali, pero que puede ser fácilmente biodisponible.

Como se ha mencionado anteriormente, estas fracciones extraídas corresponden a formas químicas, que de acuerdo a su estabilidad y facilidad de extracción podrían relacionarse con su capacidad para ser transformadas en formas disponibles para las plantas. Así, las fracciones de Pi-resina y Pi-NaHCO<sub>3</sub>, pueden considerarse formas de P disponibles de manera inmediata, las formas de Po-NaHCO<sub>3</sub>, a corto plazo, luego de mineralización del Po, el P-NaOH y el Pi HCl a mediano plazo, y el P residual a largo plazo.

### **Ejemplos del uso del fraccionamiento para establecer los efectos de sistemas de producción en sabanas bien drenadas sobre la fertilidad fosfórica**

El estudio del ciclaje de nutrientes en los ecosistemas de sabanas y sus agroecosistemas asociados, ha sido una de las principales líneas de investigación en el país. Ello se debe al interés de profundizar el conocimiento sobre los ciclos biogeoquímicos en estos ecosistemas y los cambios que sufren estos por las prácticas productivas, con mira de identificar la sostenibilidad de sistemas de producción tradicionales y alternativos. Una de las utilidades de las técnicas de fraccionamiento, es que permite evaluar cómo manejos específicos afectan el ciclaje de P en el suelo, a través de los cambios que se producen en sus diferentes fracciones. Evidentemente, aquellos manejos con mayor sostenibilidad son los que procuran una mejora o mayor conservación de aquellas fracciones de P disponibles inmediatamente a corto y mediano plazo, mientras que los menos sostenibles favorecen una reducción de las fracciones con mayor disponibilidad y un incremento de las fracciones recalcitrantes.

A continuación se presentan algunos ejemplos del uso de técnicas de fraccionamiento para determinar los cambios en la fertilidad fosfórica del suelo, en sistemas tales como: a) ganadería extensiva sobre pastos nativos b)

plantaciones forestales de pino, c) asociaciones pasto-maíz como barbechos mejorados y d) cultivos fertilizados con abonos orgánicos. A continuación se presentan los resultados más importantes de estos casos, en donde se utilizó como esquema de fraccionamiento, el método propuesto por Hedley y col. (1982) (Cuadro 1), con algunas modificaciones para cada caso.

### **Caso 1: Ganadería extensiva sobre pastos nativos**

El pastoreo extensivo de bovinos es el tipo de utilización de la tierra más frecuente en las sabanas de *Trachypogon*, que deben su nombre a esta gramínea nativa que domina en condiciones de suelos ácidos y bien drenados de los llanos venezolanos. Durante la época seca, la quema es una práctica muy extendida en estas sabanas, ya que permite promover la producción de pastos con mayores valores nutritivos y más aceptables para el ganado. Con el fin de evaluar el impacto de este manejo tan ampliamente extendido en las sabanas de *Trachypogon*, Hernández Valencia (1996) llevó a cabo una evaluación de las fracciones de P en el suelo superficial (0-15 cm) de un Typic Haplustox, en una sabana sometida a pastoreo extensivo y quemas frecuente (anual, bianual) y otra adyacente protegida de la quema y el pastoreo por 32 años, ubicadas ambas en la Estación Biológica de los Llanos (8 km al sur de Calabozo, Estado Guárico). Se usó el esquema de fraccionamiento de Hedley y col. (1982), pero se incluyó la determinación del P en el agua que contenía la resina de intercambio, con el fin de estimar el contenido de éste que no es adsorbido por la resina. Los resultados mostraron que en las sabanas sometidas a quema y pastoreo, los contenidos  $P_i$ -NaHCO<sub>3</sub> ( $P_i$  disponible de manera inmediata) y  $P_o$ -NaOH ( $P_i$  disponible a mediano plazo, previa mineralización) fueron menores y ello a su vez se reflejó también en un menor contenido del  $P_o$  y del P total (Cuadro 2), mientras que las fracciones restantes no mostraron diferencias significativas. Se detectó  $P_i$  en el agua remanente de la extracción en la resina, que si bien es una concentración muy pequeña, es de una cuantía importante en relación al P extraído con NaHCO<sub>3</sub>,

En apoyo a estos resultados, Hernández-

Valencia y López-Hernández (2002) encontraron que las quemas en sabanas de Calabozo generaban pérdidas de P a través de las cenizas dispersadas en la atmósfera. Por otro lado, los aportes de P contenido en la precipitación (seca ó húmeda) no lograban restituir estas pérdidas, si las quemas eran anuales o bianuales, aunque si cuando se realizan cada tres años o más. Se ha demostrado también que la protección contra las quemas y el pastoreo en la Estación Biológica de Los Llanos ha producido un incremento en la densidad de árboles (Thielen y col., 2008), especialmente de especies deciduas (San José y Fariñas, 1983), que pueden suministrar mayor cantidad de materia orgánica con mayor contenido nutricional al suelo respecto a las especies siempreverdes (Montes y Medina, 1977). En consecuencia, este es otro mecanismo complementario con el cual se puede justificar el mayor contenido de P del suelo de las sabanas protegidas. Adicionalmente, los árboles pueden mejorar el contenido nutricional del suelo superficial al actuar como bombas de nutrientes transportados desde el subsuelo a la superficie, o bien como trampas de nutrientes cuando su follaje captura los nutrientes contenidos en la precipitación, en las excretas de las aves y en el polvo y las cenizas suspendidos en la atmósfera (Kellman, 1979, Belsky y col., 1995). Estos resultados pueden justificar las diferencias en el contenido de P total y  $P_o$ , al ser mayor los aportes de materia orgánica y P al suelo en las sabanas protegidas. En este caso, como las diferencias en aquellas fracciones que mostraron diferencias significativas fueron muy pequeñas, se podría concluir que luego de 32 años la quema ha generado un impacto bajo sobre el capital del P del suelo y sus fracciones, y en consecuencia es una práctica que pudiera considerarse sostenible.

### **Caso 2: Plantaciones forestales de pino**

En el año 1969 con el fin de producir pulpa de papel y madera, la Compañía Nacional de Reforestación implementó un programa de desarrollo forestal al sur del estado Monagas, en donde se introdujeron plantaciones de Pino Caribe, en sabanas con suelos ácidos y arenosos, dedicadas a la ganadería extensiva. Después de 30 años, este desarrollo ha alcanzado una superficie de más de 600.000 ha, lo que la ha convertido en la plantación

forestal monoespecífica más grande del trópico y con planes para seguir expandiéndose, y cuyos impactos ambientales y sobre la calidad del suelo no se conocen completamente. Cabe destacar que a la fecha estas plantaciones no reciben fertilización alguna, excepto cuando las plántulas se desarrollan en condiciones de umbráculo.

Para determinar los cambios en la fertilidad fosfórica producidos por la transformación de sabanas en pinares, Hernández-Valencia y Bautis (2005) estudiaron los contenidos de las diferentes fracciones de P en un Psammentic Haplustox de una sabana nativa (control) y un pinar adyacente con 24 años de establecimiento. En este caso se utilizó la técnica de fraccionamiento de Hedley col. (1982), que incluyó la incorporación de una extracción con HCl concentrado y caliente luego de la extracción con HCl diluido, para obtener el remanente de Po que queda en el residuo.

Los datos del fraccionamiento mostraron que el establecimiento del pinar solamente procuró un aumento de la fracción de Po moderadamente lábil (Po-NaOH) y en consecuencia del Po total, aunque no del P total (Cuadro 3). Los cambios en la fracción orgánica podrían explicarse por el mayor aporte de materia orgánica al suelo por el cambio de sabanas a pinares. En valor absoluto este cambio fue relativamente pequeño, razón por la cual no generó cambios significativos en el contenido de P total. Ello permite concluir que después de 24 años, el desarrollo forestal con pinares no ha tenido un impacto significativo en las distintas fracciones de P del suelo, y en consecuencia este sistema de producción forestal es sostenible en lo que respecta a este parámetro.

### **Caso 3: Ganadería sobre maíz sembrado bajo siembra directa con cultivos de cobertura de pastos y leguminosas**

La baja productividad primaria de las sabanas bien drenadas restringe el desarrollo de una actividad pecuaria intensiva. No obstante, una mejora de la productividad de las sabanas basado en la incorporación de pastos foráneos más productivos, altas dosis de fertilizantes y agroquímicos, junto con la presencia de suelos susceptibles a la degradación y lluvias con alto

poder erosivo, han conducido inevitablemente a una merma en la calidad del suelo que se refleja en una pérdida de la productividad agrícola.

En la búsqueda de alternativas de producción más sostenibles, se llevó a cabo un estudio piloto en la Estación Experimental de La Iguana, Estado Guárico, en donde se evaluaron diferentes coberturas de pastos como barbechos mejorados sembrados bajo labranza convencional y roca fosfórica como enmienda y fuente de P. Un año más tarde se sembró maíz mediante siembra directa sobre los residuos de las coberturas y se fertilizó con urea, fosfato diamónico y cloruro de potasio (Lozano, 2007), fertilización que se mantuvo en los años siguientes. El suelo de este ensayo fue identificado como Ustoxic Quartzipsamment y los pastos evaluados fueron *Urochloa dictioneura* y *Centrosema macrocarpum*, así como la vegetación silvestre que se desarrolla luego del manejo agronómico. Se tomaron muestras del suelo superficial (0-5 cm), antes del establecimiento de los tratamientos y tres años después, con el fin de determinar los cambios en el status de P en los diferentes tratamientos (Hernández-Valencia y col., 2004). En este caso se aplicó la técnica de fraccionamiento de Hedley col. (1982).

Los resultados indican que luego de 3 años, las diferentes coberturas produjeron cambios en el status de P del suelo (Cuadro 4). La cobertura con vegetación silvestre y *C. macrocarpum* evidenciaron una mejora en la disponibilidad de P para las plantas por el incremento en la fracción extraíble con NaHCO<sub>3</sub>. La fertilización también favoreció un incremento de las formas moderadamente disponibles de Pi (Pi-NaOH), pero con una reducción en el Po moderadamente lábil (Po-NaOH) en la vegetación silvestre y *U. dictioneura* y el P más recalcitrante (P-residual). Por su parte, luego de 3 años, el P adicionado a través de la roca fosfórica fue reducido a concentraciones similares a las encontradas antes de establecer las coberturas. Estos hallazgos sugieren que parte del Pi adicionado a través de la fertilización reaccionó para formar compuestos secundarios de hierro y aluminio, mientras que las formas orgánicas moderadamente lábiles y resistentes fueron mermadas para favorecer la nutrición de las plantas, o suplir aquellas fracciones

de P que mostraron incremento o se mantuvieron constante (Pi-resina, Pi-NaHCO<sub>3</sub>, Pi-NaOH). A este respecto, Sharpley (1985) mostró que en suelos bajo cultivo de maíz, durante la época de crecimiento las fracciones de Po-NaOH disminuyen, lo que le permite concluir que esta reducción permite mantener relativamente estable el de Po-NaHCO<sub>3</sub>, que es una fuente de Pi a corto plazo para la nutrición mineral. También en concordancia a estos resultados, Beck y Sánchez (1994) encontraron para un Typic Paleudult de Yurimaguas, que la fracción de P extraíble con NaOH, actuó como un sumidero del P adicionado por la fertilización inorgánica.

El tratamiento bajo *U. dictioneura* pudiera ser el más demandante de P, ya que redujo el contenido de P total y disponible. Sin embargo, ello debe ser correlacionado con el contenido de P en las pasturas y el maíz, con el fin de determinar cual sistema fue más eficiente en términos de una mayor producción de biomasa, mayor contenido de P de ésta y menor reducción del P disponible en el suelo.

#### **Caso 4: Sistemas de producción agrícola fertilizados con abonos orgánicos**

Las sabanas del estado Amazonas en Venezuela, presentan fuertes restricciones para el desarrollo agrícola intensivo por el excesivo drenaje y pobreza nutricional de sus suelos. Aunado a ello, el transporte de los insumos que permitan mejorar la fertilidad es muy oneroso, por lo alejado de las fuentes de producción y la disminución del subsidio de estos rubros. Pese a las limitaciones, algunos agricultores asentados en las sabanas de los alrededores de Puerto Ayacucho, han logrado establecer sistemas de producción mediante el uso de diferentes formas de abonos orgánicos, práctica que no solo mejora la productividad vegetal y la calidad del suelo, sino que también favorece la reutilización de desechos y la reducción de los costos de producción.

López-Contreras y col. (2006) evaluaron los cambios en fracciones de P en los suelos superficiales (0-10 cm) de un Typic ustipsamments ubicado en las sabanas de *Trachypogon* cercanas a Puerto Ayacucho (Edo. Amazonas) y en donde se desarrollaban tres sistemas de producción agrícola

que se diferenciaron en el tipo de abono orgánico utilizado. Los abonos orgánicos usados fueron: estiércol vacuno o majada (SPM), gallinaza (SPG) y porquinaza y compost (SPC), mientras que las sabanas nativas sin fertilización fueron consideradas como control de los cambios. El tipo de cultivo y las características de manejo son presentados con mayor detalle por López-Hernández y col. (2006). En este estudio se realizó una ligera modificación a la técnica de fraccionamiento de Hedley y col. (1982), ya que se midió el Pi remanente en el agua proveniente de la extracción de Pi con la resina de intercambio aniónico.

Los suelos de sabanas controles presentaron bajos tenores de P total y de formas disponible para las plantas (Pi-agua + Pi-resina + Pi NaHCO<sub>3</sub>) (Cuadro 5), pero con la adición de las enmiendas orgánicas, el contenido de P total y del P disponible incrementó, siendo más marcados para el SPG y menor para el SPC. Dentro de las fracciones inorgánicas, todos los compartimientos se vieron favorecidos por la adición de los abonos orgánicos, pero especialmente las fracciones asociadas a Pi-resina, Pi-NaOH y Pi-HCl. Los cambios en las fracciones orgánicas fueron de menor magnitud que los observados para las fracciones inorgánicas. En este caso las fracciones asociadas a la extracción alcalina (Po-NaOH y Po-NaOH-sonicación) fueron las que mostraron los mayores incrementos, siendo nuevamente el SPG el que mostró los cambios más marcados (Cuadro 5). En lo que respecta a la fracción residual, si bien se observaron incrementos significativos en términos absolutos, en términos relativos estos fueron de menor cuantía respecto a las demás fracciones estudiadas, lo que indica que gran parte del P adicionado se almacenó dentro de formas de mayor disponibilidad que la fracción recalcitrante. Este comportamiento es acorde si se considera que esta fracción es afectada a largo plazo por eventos geoquímicos.

Si bien los abonos orgánicos aplicados, difieren en su composición química, tiempo, frecuencia y cantidad aplicada, algunos rasgos comunes sobresalen cuando se analiza la distribución relativa porcentual de esta ganancia P dentro de las fracciones inorgánicas, orgánicas y

residual. Destaca que la mayor parte del incremento se manifiesta en forma de P inorgánico (70 a 81%), seguido por la fracción orgánica (17 a 31%) y finalmente la residual (0 a 8%). Si se discrimina esta redistribución dentro de los compartimientos inorgánicos (Figura 1) y orgánicos (Figura 2), las fracciones Pi-NaOH y Po-NaOH son las que acusan los mayores cambios, exceptuando la SPM, en donde el Po-NaOH-sonificación es el que muestra la mayor ganancia. Si se agrupa la ganancia de P de acuerdo a su disponibilidad inmediata (Pi-agua, Pi-resina, Pi-NaHCO<sub>3</sub>), a corto (Po-NaHCO<sub>3</sub>), mediano (P-NaOH, Pi-HCl) o largo plazo (P-residual), se observa que el P acumulado en el suelo se almacena principalmente como fracciones disponibles a mediano plazo, seguido por las de corto y largo plazo, mientras que las formas con disponibilidad inmediata registran cambios menores (Figura 3). Con estos resultados es claro que el uso de estos abonos orgánicos aumenta la disponibilidad de fósforo y las reservas a corto y mediano plazo, que hacen más sostenible este tipo de sistemas de producción en el Amazonas venezolano.

### Consideraciones Finales.

Los ejemplos aquí presentados muestran que el establecimiento de sistemas de producción agrícola, pecuario o forestal en sabanas bien drenadas, generan cambios en el contenido total y/o la distribución del P del suelo. Destaca el hecho que la fracción correspondiente a Po-NaOH evidenció cambios significativos en todos los sistemas, con un aumento en los casos de: a) ganadería sobre pastos nativos, b) plantaciones forestales de pino, y c) sistemas de producción agrícola fertilizados con abonos orgánicos. A este respecto, Tiessen y col. (1984) señalan que en suelos altamente meteorizados, como consecuencia de las transformaciones que ocurren en el suelo, la fracción de Po-NaOH puede actuar como sumidero del Pi disponible. Adicionalmente, en estos sistemas hay mayores aportes de materia orgánica al suelo en relación a la sabana nativa, lo que pudiera explicar también el incremento de esta fracción. En contraste, en el sistema ganadero con maíz sembrado bajo siembra directa con cultivos de cobertura de pastos y leguminosas, aunque también hay mayores aportes de materia orgánica

por los residuos que deja la labranza mínima, se observó una reducción del Po-NaOH y el P-residual, pero un incremento en el Pi-NaOH. En este caso es probable que el Po-NaOH y el P residual sean más susceptibles de sufrir transformaciones que procuren Pi para las plantas, y que el Pi-NaOH actúe más como sumidero del P adicionado por fertilización. En este manejo, el incremento de la fracción Pi-NaOH pudiera ser producto de la formación de compuestos de P-Al y P-Fe más estables (Tiessen y col. 1983), en relación al Po-NaOH y el Po contenido en la fracción residual. Como se ha mencionado antes sobre la fracción residual, ésta puede contener Po asociado a la materia orgánica particulada que puede ser fácilmente biodisponible (Tiessen y Moir, 1993).

Los cambios observados en la distribución del P del suelo fueron leves como en el caso de la ganadería extensiva basada en la renovación de pastos palatables a través de la quema o en las plantaciones de pino, y en donde ambas se caracterizan por la ausencia de aportes de P a través de fertilizantes. Estos casos son de interés particular, por lo extendido que se encuentran dentro del territorio nacional y las escasas evaluaciones que se han hecho sobre los impactos que generan al ambiente, y en consecuencia sobre su sostenibilidad. Otros sistemas de producción de escasa tradición en el país, basados en el uso de la labranza mínima o abonos orgánicos y en donde existe un aporte considerable de P por fertilización, muestran respuestas variadas dependiendo de la cantidad y tipo de fertilizantes, tipo de cultivos y manejos de estos, así como de las condiciones de suelo y clima. En estos sistemas son más marcados los cambios en la distribución de las diferentes formas de P, algunos más favorables en cuanto a una mejora en aquellas fracciones con disponibilidad inmediata para las plantas, como en el caso de *C. macrocarpum* y la vegetación silvestre en comparación a *U. dyctioneura*, ó los sistemas de Majada y Gallinaza, en relación al de Compost, aunque los contenidos de P total no mostraron diferencias muy marcadas entre los tratamientos estudiados.

Con los ejemplos presentados se demuestra la utilidad de los métodos de fraccionamiento de P para establecer los cambios en la fertilidad

fosfórica y en consecuencia contribuir con otros indicadores en el establecimiento de la sostenibilidad de los sistemas de producción tradicionales y alternativos que se desarrollan en las sabanas bien drenadas.

**Cuadro 1.** Extractantes utilizados en el fraccionamiento secuencial del fósforo de Hedley y col. (1982).

Extractante	Fracción de fósforo
Agua con resina de intercambio Dowex-Cl 1x 8	dePi en solución e isotópicamente intercambiable altamente disponibles para la biota
NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	Pi débilmente adsorbido a la superficie de intercambio
NaOH 0,1M	Po fácilmente hidrolizable (ej. ácidos nucleicos, inositol fosfato, glicerofosfato, etc) Pi asociado con compuestos amorfos y cristalinos de hierro y aluminio
HCl 1M	Po asociado a los ácidos fúlvicos y húmicos Pi asociado a minerales primarios
Digestión con H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> concentrados	Pi y Po recalitrantes

**Cuadro 2.** Fracciones de P ( $\mu\text{g P.g}^{-1}$  suelo) en sabanas de *Trachypogon* protegidas y no protegidas de la quema y el pastoreo por 32 años (Hernández Valencia 1996).

Fracción	Sabana protegida	Sabana no protegida
	<b>P inorgánico</b>	
Pi-agua	0,5 a	0,7 a
Pi-resina	0,5 a	0,6 a
Pi-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	3,2 a	1,5 b
Pi-NaOH 0,1M	3,3 a	3,6 a
Pi-HCl 1,0 M	0,5 a	0,4 a
<b>Total Pi</b>	<b>7,8 a</b>	<b>6,8 a</b>
	<b>P orgánico</b>	
Po-agua	0,0 a	0,0 a
Po-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	2,3 a	2,5 a
Po-NaOH 0,1M	34,8 a	41,1 b
<b>Total Po</b>	<b>36,1 a</b>	<b>43,6 b</b>
<b>P residual</b>	<b>82,9 a</b>	<b>90,8 a</b>
<b>Total P</b>	<b>126,8 a</b>	<b>141,2 b</b>

Letras diferentes dentro de una misma fracción de P, indican medias diferentes (t student,  $p < 0,5$ ).

**Cuadro 3.** Fracciones de P ( $\mu\text{g P.g}^{-1}$  suelo) en sabanas y pinares establecidos hace 28 años (Hernández Valencia y Bautis 2006).

Fracción	Sabana protegida	Sabana no protegida
	<b>P inorgánico</b>	
Pi-resina	0,7 a	0,6 a
Pi-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	7,3 a	6,3 a
Pi-NaOH 0,1M	3,1 a	3,4 a
Pi-HCl concentrado	1,6 a	1,9 a
Pi-residual	42,7 a	41,3 a
<b>Total Pi</b>	<b>55,4 a</b>	<b>53,5 a</b>
	<b>P orgánico</b>	
Po-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	4,0 a	4,7 a
Po-NaOH 0,1M	4,1 a	8,6 b
<b>Total Po</b>	<b>8,1 a</b>	<b>13,3 b</b>
<b>Total P</b>	<b>74,6 a</b>	<b>78,2 a</b>

Letras diferentes dentro de una misma fracción de P, indican medias diferentes (t student,  $p < 0,5$ ).

**Cuadro 4.** Fracciones de P ( $\mu\text{g P.g}^{-1}$  suelo) en los primeros 55 cm de suelos de sabana y en asociaciones de pastura-maíz.

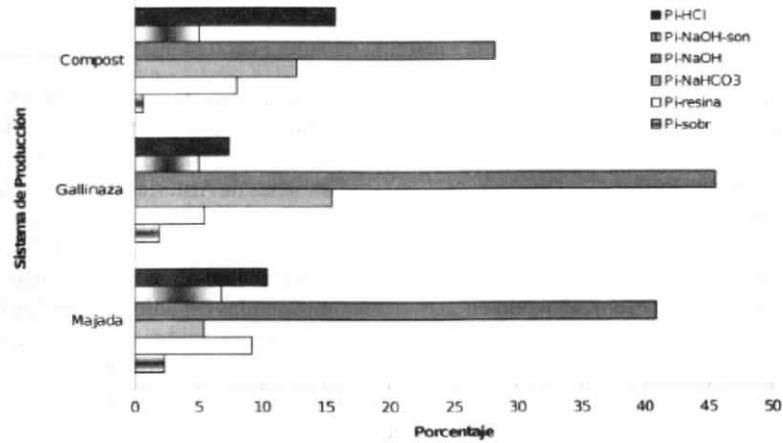
Fracción de P	Sabana sin intervención	Vegetación silvestre	<i>Urochloa dictioneura</i>	<i>Centrosema macrocarpa</i>
<b>P inorgánico</b>				
Pi-Resina	4,5 a	6,2 a	2,9 b	5,3 a
Pi-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	7,3 a	11,0 b	5,4 a	11,4 b
Pi-NaOH 0,1M	5,9 a	19,0 b	17,2 b	24,5 c
Pi-HCl 1,0M	1,2 a	2,1 a	1,8 a	1,6 a
<b>Total-Pi</b>	<b>18,9 a</b>	<b>38,3 c</b>	<b>27,3 b</b>	<b>42,8 c</b>
<b>P orgánico</b>				
Po-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	7,3 a	5,6 a	6,7 a	11,4 b
Po-NaOH 0,1M	23,2 a	13,0 b	13,1 b	21,6 a
<b>Total-Po</b>	<b>30,5 a</b>	<b>18,6 a</b>	<b>19,8 a</b>	<b>33,0 b</b>
<b>P-Residual</b>	<b>36,2 a</b>	<b>22,3 b</b>	<b>28,6 c</b>	<b>20,3 b</b>
<b>P- Total</b>	<b>85,6 a</b>	<b>79,2 b</b>	<b>75,7 b</b>	<b>96,1 c</b>

Letras diferentes indican medias diferentes. Anova ( $p < 0.05$ ).

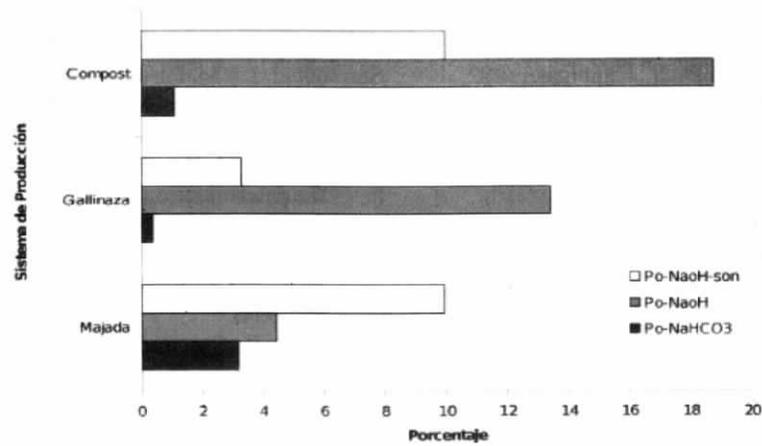
**Cuadro 5.** Fracciones de fósforo ( $\mu\text{g P.g}^{-1}$  suelo) en los diferentes sistemas de producción del amazonas venezolano fertilizados con abonos orgánicos.

Fracción	Sistema de Producción Majada		Sistema de Producción Gallinaza		Sistema de Producción Compost	
	C	A	C	A	C	A
<b>P inorgánico</b>						
<i>Pi-sobrenadante resina</i>	0,0 a	15,3 b	0,2 a	19,8 b	0,7 a	2,5 b
Pi-resina	0,6 a	60,9 b	0,1 a	55,2 b	0,2 a	23,2 b
Pi-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	6,9 a	42,4 b	2,8 a	159,8 b	5,3 a	41,6 b
Pi-NaOH 0,1M	12,2 a	281,7 b	9,3 a	471,2 b	18,7 a	99,5 b
Pi-NaOH 0,1 M - sonicado	3,4 a	48,2 b	2,7 a	53,6 b	4,4 a	18,9 b
Pi-HCl 1M	0,2 a	68,6 b	0,2 a	74,9 b	1,1 a	46,1 b
<b>Total Pi</b>	<b>23,3</b>	<b>517,1 b</b>	<b>15,3 a</b>	<b>834,5 b</b>	<b>30,4 a</b>	<b>231,8 b</b>
<b>P orgánico</b>						
Po-NaHCO <sub>3</sub> 0,5M	6,3 a	27,2 b	1,8 a	5,4 b	5,3 a	8,4 b
Po-NaOH 0,1M	36,9 a	66,1 b	47,3 a	183,0 b	51,9 a	105,5 b
Po-NaOH 0,1M- sonicado	11,1 a	76,5 b	10,3 a	43,6 b	13,2 a	41,7 b
<b>Total Po</b>	<b>54,3 a</b>	<b>169,8 b</b>	<b>59,4 a</b>	<b>232,0 b</b>	<b>70,4 a</b>	<b>155,6 b</b>
<b>P residual</b>	<b>114,6 a</b>	<b>163,9 b</b>	<b>104,4 a</b>	<b>127,2 b</b>	<b>113,1 a</b>	<b>112,6 a</b>
<b>P total</b>	<b>192,2 a</b>	<b>850,8 b</b>	<b>179,1 a</b>	<b>1.193,7 b</b>	<b>213,9 a</b>	<b>500,0 b</b>

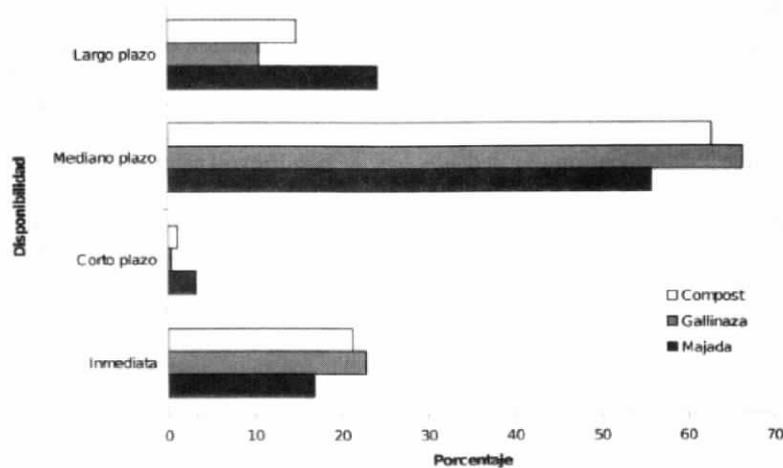
C: Control, A: Abono. Las comparaciones son para un mismo tratamiento y fracción de fósforo. Letras diferentes indican que las medias son diferentes (U Mann Whitney  $p < 0,05$ ).



**Figura 1.** Distribución de la ganancia relativa de P entre las diferentes fracciones inorgánicas de sistemas de producción del Amazonas venezolano fertilizados con abonos orgánicos.



**Figura 2.** Distribución de la ganancia relativa de P entre las diferentes fracciones orgánicas de sistemas de producción del Amazonas venezolano fertilizados con abonos orgánicos.



**Figura 3.** Distribución de la ganancia relativa de P de acuerdo a su disponibilidad de sistemas de producción del Amazonas venezolano fertilizados con abonos orgánicos.

## LITERATURA CITADA

- Beck, M. y P. Sánchez. 1994. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Sci.* 34: 1424-1431.
- Belsky, A. J., Mwonga, S. M., Amundson, R.G., Duxbury, J.M. y A. R. Ali. 1993. Comparative effects of isolated trees on their under canopy environments in high and low-rainfall savannas. *J Appl. Ecol.* 30:143-155.
- Berrotarán, J. L. 2000. Modelo de utilización cereal-pasto en sistemas de producción de sabanas bien drenadas con suelos ácidos en Venezuela. *Interciencia* 25: 203-209.
- Bowman, R. A. y C. V. Cole. 1978. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. *Soil Sci.* 125: 95-101.
- Chang, S. C. y M. L. Jackson. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Sci.* 84: 133-144.
- Bravo, C., Lozano, Z., Hernández, R. M., Piñango, L. y B. Moreno. 2004. Efecto de diferentes coberturas sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana con siembra directa. *Bioagro* 16: 163-172.
- Hedley, M. J., Stewart, J.W. B. y B. S. Chauhan. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 970-976.
- Hernández Valencia, I. 1996. Dinámica del fósforo en una sabana de *Trachypogon* de los Llanos Altos Centrales. Tesis de Grado. Postgrado de Ecología. UCV. Caracas. 183 pp.
- Hernandez-Valencia, I. y D. López-Hernández. 2002. Pérdida de nutrimentos por la quema de vegetación en una sabana de *Trachypogon*. *Rev. Biol. Trop.* 50: 1013-1019.
- Hernández-valencia, I., Hernández-Hernández, R. Mm, Lozano, Z. y C. Bravo. 2004. Fracciones de fósforo en el suelo bajo diferentes asociaciones de maíz y pastos. Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de las Ciencias del Suelo. Cartagena, Colombia. CD-ROM.
- Hernández-Valencia, I. y M. Bautis. 2005. Cambios en el contenido de fósforo en el suelo superficial por la conversión de sabanas en pinares. *Bioagro* 17: 69-78.
- Hongqing, H., Chunying, T., Chongfa, C., Jizheng, H y L. Xueyuan. 2001. Availability and residual effects of phosphate rocks and inorganic P fractionation in a red soil of Central China. *Nut. Cyc. Agric.* 59: 251-258.
- López-Contreras, A., Hernández-Valencia, I. y D. López-Hernández. 2006. Fraccionamiento de fósforo en suelos arenosos de granjas orgánicas en el Amazonas venezolano. *Agrobiol.* 3: 29-35.
- López-Hernández, D., Hernández-Hernández, R. M. y M. Brossard. 2005. Historia del uso reciente de tierra de las sabanas de América del Sur. Estudio de casos en sabanas del Orinoco. *Interciencia* 30(10): 623-630.
- López-Hernández, D., López, A. Y., Hernández-Valencia, I., Ojeda, D. A. y C. Hernández. 2006. Efectos de enmiendas orgánicas sobre las formas activas de C, N y P en suelos ácidos arenosos de sabanas localizadas en el Amazonas venezolanos. *Agrobiol.* 3: 22-28.
- Kellman, M. 1979. Soil enrichment by neotropical trees. *J. Ecol.* 67: 565-577.
- Lozano, Z. 2007. Indicadores de calidad de la materia orgánica de un suelo bajo agricultura conservacionista. Tesis de Grado Postgrado en Ciencias del Suelo. UCV. Facultad de Agronomía. Maracay. 209 pp.
- Montes, R. y E. Medina. 1977. Seasonal changes in nutrient content of leaves of savanna trees with different ecological behavior. *Geo. Eco. Trop.* 1: 295-307
- San José, J. J. y M. Fariñas. 1983. Changes in tree density and species composition in protected *Trachypogon* savanna, Venezuela. *Ecology* 64: 447-453
- Saunders, W. M. H. y E. G. Williams. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. *J. Soil Sci.* 6: 254-267.
- Sharpley, A. N. 1985. Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49: 905-911
- Thielen, D. R., San José, J. J., Montes, R. A. y R. Laird. 2008. Assessment of land use changes on woody cover and landscape fragmentation in the Orinoco savannas using fractal distribution. *Ecol. Indic.* 8: 224-238
- Tiessen, H. y O. Moir. 1993. Characterization of available P by sequential extraction. In: Carter, M. R. (ed.) Soil sampling and methods of soil analysis. Lewis Publishers, Boca Ratón, Fl. pp. 75-86.
- Williams, J. D. H., Syers, J. K. y T. W. Walker. 1967. Fractionation of soil organic inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31: 736-739.
- Williams, J. D. H. y T. W. Walker. 1969. Fractionation of phosphate in a maturity sequence of New Zealand basaltic soil profiles. *Soil Sci.* 107: 22-30.
- Yuan, T. L., Robertson, W. K. y J. R. Neller. 1960. Forms of newly fixed phosphorus in three acid sandy soils. *Soil Sci. Amer. Proc.* 24: 447-450.