

CAPITULO 7

DETERMINACION DE FOSFORO EN EL SUELO

Por: Leyla Amparo Rojas Escobar*

Edgar Amézquita Collazos

7.1. Fósforo disponible

Los métodos de extracción de fósforo (P) disponible para los cultivos son muy variados y están encaminados a medir una fracción que correlacione con la respuesta por las plantas. En general, el fósforo extraíble de suelos ácidos con soluciones ácidas se puede correlacionar con la respuesta de la fertilización fosfatada, pero en suelos neutros o alcalinos la correlación no es buena. De ahí que la elección del método mas apropiado depende del tipo de suelo que se analiza.

Para evaluar la disponibilidad de fósforo se han utilizado muchos métodos los cuales varían en el tipo de solución empleada para extraer el elemento del suelo.

Dentro de las soluciones empleadas se distinguen dos tipos:

- Aquellos que contienen ácidos y son eficaces para la extraer los fosfatos de calcio.
- Soluciones alcalinas que disuelven mejor los fosfatos de hierro y aluminio.

Por esta razón las soluciones ácidas se adaptan mejor en suelos ácidos donde la disponibilidad de fósforo depende principalmente de los compuestos de calcio; las soluciones alcalinas deben usarse en suelos de pH alto para no disolver el fósforo apatítico, el cual es insoluble a este pH.

Para la determinación cuantitativa del fósforo extraíble por cualquiera de los métodos se utiliza la colorimetría. Generalmente se usa el color azul desarrollado por la reducción con cloruro estañoso ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o con ácido ascórbico del complejo fósforo molibdico formado por la adición de molibdato de amonio a una alícuota de extracto que contiene el

* Químico Ph. D. e Ingeniero Agrónomo Ph. D. respectivamente. Programa Suelos Instituto Colombiano Agropecuario. Apartado Aereo 151123 Bogotá. 1989.

fósforo. La intensidad del color depende de la concentración de fósforo; la lectura se hace en un fotocolorímetro a una longitud de onda de 660 nm.

7.2. Método Bray II

1.2.1. Principio

Este método usa como solución extractora una mezcla de fluoruro de amonio (NH_4F) 0.03N y ácido clorhídrico (HCl) 0.1N. Se utiliza ácido clorhídrico 0.1N con el fin de incluir una mayor cantidad de fósforo proveniente de la apatita del suelo. El ión fluor (F^-) puede solubilizar los fosfatos de hierro y aluminio por su propiedad de formar complejos con estos cationes en solución ácida, con la consecuente liberación del fósforo retenido en el suelo por esos iones trivalentes.



El medio ácido también disuelve la parte más activa de los fosfatos de calcio presentes.

Por su parte para el desarrollo de color, algunos investigadores han propuesto el uso de un reactivo simple para determinar fósforo, el cual contiene ácido sulfúrico, molibdato de amonio, ácido ascórbico, nitrato de antimonio y potasio en una solución simple, la cual reacciona con el ortofosfato para producir un color estable en 10 minutos. Estos investigadores encontraron que el antimonio (como tartrato de antimonio y potasio) aceleraba el desarrollo de color y este permanecía estable durante 24 horas. (watanabe y Olsen, 1962; Murphy y Riley, 1962).

7.2.2. Reactivos

- Solución extractora (HCl 0.1N, NH_4F 0.03N)

Disolver 11.4 g de NH_4F y 16.64 mL de HCl 6N en 200 mL de agua y completar a volumen de un litro.

- Desarrollo de color :

Solución A

Disolver 60 g de molibdato de amonio ($(\text{NH}_4)_6\text{MoO}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en 200 ml de agua; añadir 1,455 g de tartrato de antimonio y potasio ($\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) y agitar hasta que disuelva. Agregar lentamente con agitación suave 700 mL de ácido sulfúrico concentrado. Enfríar la solución y diluir al volumen de un litro con agua. Enfríar en frasco oscuro bajo refrigeración.

Solución B

Disolver 132 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) en 500 mL de agua. Completar a volumen de un litro. Guardar en frasco oscuro bajo refrigeración.

Las soluciones A y B deben almacenarse en un lugar frío y oscuro por ser sensibles a la luz y el calor.

- Solución de trabajo

Preparar esta solución el día que se va a utilizar, a partir de las soluciones A y B del párrafo anterior. Tomar 25 mL de la solución A y transferir a un vaso de un litro, que contenga 800 mL de agua. Mezclar y añadir 10 mL de la solución B y luego llevar a un litro con agua.

- Solución estándar de fósforo

En un balón aforado de un litro disolver en 300 mL de agua 0.2195 g de fosfato ácido de potasio cristalino (KH_2PO_4), previamente secado durante una hora a 105°C . Esta solución contiene 50 ppm de P a partir de la cual se preparan las soluciones para la curva patrón de P de la manera como se indica a continuación:

Concentraciones de las soluciones patrón de fósforo

<u>Volumen de la solución estándar</u> (50 ppm P) mL	<u>volumen final con agua (mL)</u>	<u>Concentración de fósforo</u> (ppm)
0	100	0
1	100	0.5
2	100	1.0
4	100	2.0
8	100	4.0
12	100	6.0
16	100	8.0
20	100	10.0

7.2.3. Procedimiento

Pesar una muestra de 2.85 g de suelo y transferir a un vaso de extracción de 50 mL. Añadir 20 mL de la solución extractora y agitar durante 40 segundos. Filtrar la solución en papel de filtro Whatman No 42 o su equivalente en un vaso de 50 mL. A una alícuota de 2 mL del extracto de suelo agregar 18 mL de la solución de trabajo. Este procedimiento se sigue con las soluciones patrón de P, de manera que las concentraciones de P varíen entre 0.05 y 1.0 ppm. Después de 20 minutos leer la transmitancia en un colorímetro usando una longitud de onda de 660 nm.

Cálculos

Para convertir ppm P en la solución a ppm en el suelo se procede así:

$$P \text{ (ppm)} = Lc \times \frac{20}{pm}$$

en donde:

Lc = Lectura en la curva

pm = Peso de la muestra

P = P disponible en el suelo (ppm)

7.3. Método Bray I

7.3.1. Principio

En general este método conserva el mismo fundamento químico descrito para Bray II, puesto que utiliza también una solución ácida de fluoruro de amonio en igual concentración de NH_4F y solo se modifica en la concentración del ácido utilizado el cual es 4 veces más diluido que el Bray II.

7.3.2. Reactivos

- Solución extractora: (HCl 0.025N + NH_4F 0.03N)

Dissolver 1.11 g de NH_4F y 4.14 mL de HCl 6N en un litro de agua.

- Desarrollo de color

Para el desarrollo de color soluciones estándares de P, procedimiento y cálculos, seguir lo descrito para Bray II (numerales 7.2.2., 7.2.3. y 7.2.4.).

7.4. Método de Hunter (Olsen Modificado)

7.4.1. Principio

Este procedimiento emplea una solución extractante modificada de NaHCO_3 que según Hunter (1977) es adecuada para indicar el estado de disponibilidad de P para una amplia gama de condiciones de pH del suelo y puede usarse para determinar además K, Cu, Mn y Zn.

7.4.2. Reactivos

- Solución extractora (NaHCO_3 0.5N, EDTA 0.01M)

Disolver 42 g de carbonato ácido de sodio (NaHCO_3) en 300 ml de agua. Disolver 3.72 g de disodio EDTA en 300 mL de agua. Disolver 0.1 g de superfloc-127 en 100 a 200 mL de agua. Mezclar las tres soluciones antes mencionadas y llevar las a un litro con agua. Ajustar el pH a 8.5 con NaOH y guardar la solución en un frasco de polietileno.

- Carbón activado
- Desarrollo de color y soluciones patrones
Seguir el mismo procedimiento indicado en el método Bray II
- Solución de trabajo
Preparar igual que como se hizo para Bray II

7.4.3. Procedimiento

Colocar en un frasco de extracción 2.84 g de suelo y adicionar 25 ml de la solución extractante. Agitar a velocidad lenta aproximadamente 400 rpm durante 10 minutos. Filtrar la solución usando un papel de filtro poroso (Whatman No 1). Si el filtrado no es claro volver a agitar con carbón activado y volver a filtrar. Tomar 2 ml del filtrado, añadir 2 mL de agua y 10 mL del reactivo solución de trabajo para el desarrollo de color. Las soluciones patrón de P deben tener el mismo procedimiento que las muestras. Después de 15 minutos leer los porcentajes de transmitancia (% T) en un fotocolorímetro usando una longitud de onda de 660 nm.

Cálculos

La cantidad de P extraíble por el método de Olsen modificado, se puede calcular así:

$$P \text{ (ppm)} = Lc \times \frac{25}{pm}$$

en donde:

Lc = Lectura en la curva

pm = Peso de la muestra

7.5. Determinación de Fósforo total

7.5.1. Principio

La determinación del fósforo total del suelo se basa en la fusión del material para destruir la materia orgánica lo cual se consigue utilizando una muestra equimolecular de sales nítricas de metales alcalinos, que funde a temperatura relativamente baja (218^o C) y forma un medio fuertemente oxidante.

7.5.2. Reactivos

- Mezcla sólida de NaNO₃/KNO₃ (50/50 mol%)

Colocar 85 g de NaNO₃ y 101 g de KNO₃ (grado reactivo) en un crisol de porcelana mezclar y calentar en mufla a 350-400^oC hasta que se funda. Dejar enfriar hasta que se solidifique y luego pulverizar en mortero.

- Acido nítrico diluido

Agregar 250 mL de HNO_3 concentrado a 100 mL de agua y llevar a un litro. Preparar las soluciones de molibdato de amonio, ácido ascórbico y de trabajo como se indicó en el método de Bray II.

- Ácido clorhídrico 0.05 N

Diluir 4 mL de ácido clorhídrico concentrado en agua y llevar a volumen de 100 mL

- Curva patrón

Solución de 100 ppm de P: Disolver 0.493 g de KH_2PO_4 en agua desmineralizado y completar a volumen de un litro.

- Estándares

A partir de la solución anterior preparar en agua soluciones con concentraciones desde 0 hasta 20 ppm de P.

- Solución de trabajo

(Igual a Bray II)

7.5.3. Procedimiento

La muestra de suelo debe ser secada a 105°C , molida y tamizada en malla de 0.15 mm. Pesar 0.500 g de muestra en forma precisa. Colocar la en crisol de porcelana de 30 ml de capacidad. Agregar 1.5 g de la mezcla pulverizada de $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ en la siguiente forma: colocar 1.0 g de la mezcla sobre el suelo pesado, agitar el crisol suavemente para mezclar y luego agregar los 0.5 g restantes para que queden encima de la mezcla anterior.

Colocar el crisol en mufla precalentada a 200°C y luego subir lentamente la temperatura a 450°C , dejar la muestra a esta temperatura por una hora. Retirar el crisol de la mufla, dejar enfriar y agregar 5 mL de HCl 0.5N. Calentar en plato caliente y llevar a ebullición. Agregar 5 mL de ácido nítrico diluido y calentar la muestra por aproximadamente 15 minutos a ebullición lenta, sin dejar que el volumen baje de 10 mL (agregar agua desmineralizada si es necesario). Dejar enfriar. Transferir la muestra a un balón volumétrico de 50 mL, completar a volumen y filtrar con papel de filtro Whatman No 42. Tomar del filtrado y de los estándares alícuota de 2 mL y añadir 18 mL de solución de trabajo. Dejar en reposo 15 minutos y leer en el colorímetro a 660 nm.

Cálculos

$$P \text{ (ppm)} = \frac{L_c \times 50}{pm}$$

en donde:

L_c = Lectura en la curva

pm = Peso de la muestra

Observaciones

Para suelos con contenidos de carbón mayores del 6% la relación sales nítricas : suelo, debe ser mayor de 3:1. La temperatura de fusión no debe ser mayor de 450°C especialmente si se trabaja con suelos orgánicos, porque debe haber peligro de explosión.

7.6. Fraccionamiento de Fosfatos Inorgánicos del Suelo (Método de Chang y Jackson 2,12)

7.6.1. Principio

Los fosfatos inorgánicos del suelo pueden clasificarse en cuatro grupos principales: fosfatos de calcio, fosfatos de aluminio, fosfatos de hierro y fosfatos solubles reductantes. Los fosfatos de calcio se presentan principalmente como apatita y como fosfatos monocalcicos, dicálcicos y octacálcicos que existen en cantidades muy pequeñas o formas transitorias. Los fosfatos de hierro, aluminio y calcio también incluyen fosfatos adsorbidos y precipitados en la superficie, asociados con las diferentes clases de partículas del suelo. La disponibilidad de fósforo para las plantas depende aparentemente de la cantidad de fosfatos superficiales de las distintas especies químicas. Los métodos convencionales para la determinación de fósforo disponible, extraen una porción de todas las formas químicas dependiendo de la solubilidad o de la superficie específica. Por su parte, el fraccionamiento

de fósforo inorgánico del suelo permite determinar el estado químico del fósforo en su forma nativa y el efecto en las plantas de los fertilizantes fosfóricos aplicados al suelo. Por tanto, la técnica de fraccionamiento del fósforo es una ayuda para la química, génesis y fertilidad del suelo. Esta técnica se basa principalmente en la diferencia de solubilidad que tiene cada fosfato según el catión, cuando se utilizan distintos extractantes.

7.6.2. Reactivos

- Cloruro de amonio 1N

Diluir 53.3 g de cloruro de amonio (NH_4Cl) en agua y diluir a un litro.

- Fluoruro de amonio 0.05 y pH 8.2

Agregar 17.2 mL de ácido fluorhídrico concentrado (HF) y 33 mL de hidróxido de amonio (NH_4OH) concentrado a mas o menos 900 mL de agua. Ajustar el pH a 8.2 agregando hidróxido de amonio 4N y utilizando un potenciómetro. Llevar la solución a volumen de un litro.

- Acido sulfúrico 0.5N

Diluir 14 mL de H_2SO_4 (d: 1.89) y llevar a volumen de un litro.

- Hidróxido de sodio 0.1N

Disolver 4.1 g de NaOH en agua y diluir a un litro.

- Citrato de sodio 0.3M

Disolver 88.2 g de citrato de sodio tribásico ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en 900 mL de agua y diluir a un litro.

- Ditionito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)

- Solución saturada de cloruro de sodio

Suspender 400 g de NaCl en un litro de agua. (la solubilidad del NaCl en agua es de 36 g/100 mL a 20°C).

- Carbón activado (libre de fósforo)

- Cloruro estannoso ($\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ solución reductora 1)

Disolver 12 g de $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en 50 mL de HCl 6N. Colocar la solución en un plato caliente a 100°C hasta que aclare. Diluir a un litro con agua. Cuando la solución se haya enfriado guardarla en una botella ámbar que tenga sifón y colocarla en una capa de 10 mm de aceite mineral.

- Solución ácida cloromolibdica bórica

Disolver 4.5 g de molibdato de amonio ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en aproximadamente 150 mL de agua. Calentar hasta 600°C. Filtrar si la solución queda turbia. Cuando la solución esté fría agregar lentamente 75 mL de HCl concentrado. Dejar enfriar. Disolver 30 g de ácido bórico en 200 ml de agua y calentar a 80°C. Cuando esta solución esté fría, agregarla a la solución de molibdato de amonio. Llevar la solución final a un litro con agua.

- Solución ácida de molibdato-ácido sulfúrico

Disolver 60 g de molibdato de amonio en 800 mL de agua. Calentar a ebullición. Enfriar. Agregar 80 mL de H_2SO_4 concentrado, enfriar y diluir a un litro.

- Cloruro de sodio (solución reductora 2)

Disolver 3 g de $\text{SnCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en 200 mL de agua. Agregar 56 mL de HCl, agitar hasta que la solución esté clara (el calor de dilución del HCl debe disolver el $\text{SnCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ si el reactivo está puro). Agregar 400 mL de agua y 130 mL de ácido sulfúrico concentrado. Enfriar y diluir a un litro. Esta solución debe prepararse el día que se utiliza.

- Reductor Bray (amonio-naftol ácido sulfónico reductante)

Moler en mortero y mezclar bien los siguientes reactivos (secos): 2.5 g de 1-amonio-2-naftol-4-ácido sulfónico, 5 g de sulfito de sodio y 146 g de metasulfito de sodio. Disolver 8 g de la mezcla pulverizada en 50 mL de agua tibia. Si es posible dejar la solución en reposo durante la noche antes de ser utilizada. Esta solución puede conservarse durante 3 semanas, después de las cuales debe prepararse de nuevo a partir de la mezcla seca pulverizada.

7.6.3. Procedimiento

7.6.3.1. Extracción y Determinación de Fosfatos Unidos al Aluminio

Colocar 0.800 g de suelo seco, molido y tamizado por malla de 2 mm en un tubo de centrífuga de plástico de 50 mL de capacidad, agregar 40 mL de NH_4Cl 1N. Agitar 30 minutos para remover el P soluble y el unido al calcio intercambiable. Centrifugar la solución a 2,000 rpm por 10 minutos y descartar la solución sobrenadante. Agregar 40 mL de solución de NH_4OH 0.5N, pH8.2, agitar por media hora y centrifugar por 10

minutos a 4,000 rpm. Si la solución sobrenadante está muy coloreada, tomar 10 mL y filtrar a través de papel de filtro que contenga 0.5 g de carbón activado libre de fósforo. De esta solución o del sobrenadante, si no está coloreado, tomar en un tubo del fotocolorímetro una alícuota de 3 mL, agregar 3 mL de la solución de ácido cloromolibdico bórico. Agitar, agregar una solución de cloruro estannoso (solución reductora 1), mezclar y medir la absorbancia del color azul a 660 nm después de 15 a 30 minutos.

La solución reductora 1 da resultados precisos cuando la concentración final de P de la solución es menor o igual a 2.5 ppm. Para evitar diluciones puede utilizarse en lugar de la solución reductora 1, el reductor Bray que sirve para determinar concentraciones finales de P hasta de 5 ppm y de mayor estabilidad al color.

La curva patrón para la determinación de esta fracción de P, debe prepararse en la solución extractora de NH_4OH 0.5N y pH 8.2, preparando estándares de 0.5 hasta 4 ppm de P.

7.6.3.2. Extracción y Determinación de Fosfatos Unidos al Hierro

La muestra utilizada para la extracción del P unido al aluminio debe lavarse dos veces con porciones de 25 mL de solución saturada de NaCl agitando brevemente y centrifugando por 5 minutos a 2,000rpm. Agregar al suelo 40 mL de NaOH 0.1N y agitar durante 17 horas. Centrifugar la solución por 15 minutos a 2,400 rpm. Pasar el sobrenadante a un erlenmeyer de 50 mL, agregar 5 gotas de H_2SO_4 concentrado y agitar la muestra para que la materia orgánica flocule. Si el extracto es muy coloreado agregar un exceso de H_2SO_4 hasta que toda la materia orgánica flocule. Si este tratamiento no es suficiente debe pasarse una porción del filtrado a través de carbón activado como se hizo para la extracción de fosfatos unidos al aluminio.

Tomar una alícuota de 3 mL de sobrenadante y desarrollar el color en tubos del fotocolorímetro, en la misma forma en que se hizo para determinar fosfatos unidos al aluminio. Los extractantes deben prepararse en la solución extractante de NaOH 0.1N.

7.6.3.3. Extracción y Determinación de Fosfatos Ocluidos (Fosfatos Recubiertos por Oxidos de Hierro)

Utilizar la muestra que se usó para determinar fosfatos unidos al hierro, lavándola y centrifugándola con dos porciones de 25 mL de la suspensión saturada de NaCl. Agregar al suelo 25 mL de la solución de citrato de sodio tribásico ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y un gramo de ditionito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$), agitar 5 minutos. Calentar la suspensión en un baño de agua a 75-80°C, diluir hasta 40 mL en tubos de centrifuga marcados a 25 y 40 mL, agitar 5 minutos y centrifugar a 2,000 rpm durante 10 minutos (guardar el suelo para la siguiente determinación). Tomar 3 mL del sobrenadante y colocar los en tubo de ensayo con tapa. Agregar 1.5 mL de KMnO_4 0.25M para oxidar el ditionito y el citrato, mezclar y dejar en reposo 2 minutos. Agregar 3 mL de la solución ácida molibdato ácido sulfúrico y 10 mL de alcohol isobutilico. Invertir el tubo 25 veces para dispersar el alcohol dentro de la fase acuosa. Dejar separar la fase acuosa de la fase alcohólica. Tomar 5 mL de la fase alcohólica y agregar 3 mL de la solución reductora 2, agitar invirtiendo el tubo 25 veces. Permitir que la fase alcohólica (ahora de color azul por la formación del complejo fosfomolibdato) se separe de la fase acuosa, tomar 3 mL de la fase alcohólica, colocar en tubos del fotocolorímetro, agregar 3 mL del alcohol etílico absoluto mezclar y leer la absorción después de 45 minutos a 660 nm. Preparar estándares de 2 a 20 ppm de P utilizando para cada uno 25 mL de solución de citrato de sodio 0.3M, un gramo de ditionito de sodio y llevando la solución a 40 mL. Tomar de cada uno de los estándares 3 mL y continuar la marcha analítica como se hizo para las muestras.

7.6.3.4. Extracción y Determinación de Fosfatos Unidos al Calcio

Utilizar la muestra que se usó para fosfatos ocluidos y lavar la dos veces por medio de agitación y centrifugación, con 25 mL de solución saturada de NaCl. Agregar 40 mL de H_2SO_4 0.5N, agitar por una hora y centrifugar por 10 minutos a 2,000 rpm. Tomar directamente de los tubos de centrifuga 3 mL, colocar en tubos de fotocolorímetro y desarrollar color en la misma forma que se hizo para fosfatos unidos al aluminio. Preparar estándares de concentraciones entre 0.5 y 4 ppm en solución de H_2SO_4 0.5N.

Cálculos

Fosfatos unidos al aluminio, al hierro, ocluidos y unidos al calcio (ppm) =

$$Lc \times \frac{40}{pm}$$

en donde:

Lc = Lectura en cada una de las curvas estándar.

pm = Peso de la muestra (0.8 g).

7.7. Adsorción y Retención de Fosfatos en Suelos Ácidos

7.7.1. Principio

La fijación de fosfatos es el proceso por el cual, formas solubles de P aplicadas generalmente en forma de fertilizantes, pasan a formas menos aprovechables por las plantas, ocurriendo reacciones con las partículas orgánicas e inorgánicas del suelo. La retención de fosfatos ocurre generalmente por adsorción y precipitación o combinación de ambas.

Las formas amorfas de Fe y Al retienen fosfatos en mas elevada proporción que las formas cristalinas. Entre las formas cristalinas, la montmorillonita es la que presenta la mas baja capacidad de adsorción. Los suelos ácidos alcanzan la máxima capacidad de adsorción a un pH que oscila entre 3.5 y 5.0 disminuyendo cuando el pH se incrementa.

La materia orgánica bien humificada forma quelatos con el Fe y el Al; estos compuestos son los responsables de la retención de fosfatos.

Sin embargo, la materia orgánica puede también bloquear los sitios de adsorción de las partículas inorgánicas (arcillas y óxidos metálicos). La materia orgánica, juega entonces un papel ambivalente en la adsorción de los fosfatos.

7.7.2. Metodología

Se describe la metodología de Fassbender. En tubos plásticos de centrifuga, pesar nueve porciones de 2.5 g de suelo seco al aire y tamizado (2mm). Agregar a cada tubo 25 mL de solución de P de las siguientes concentraciones: 0, 2.5, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 400 ppm. Llevar a volumen de 50 a 150 mL con agua. Agitar la suspensión por 24 horas en agitador horizontal, centrifugar y determinar el P en la solución sobrenadante. Hacer las determinaciones por triplicado. Analizar los resultados usando las isothermas de adsorción de Langmuir:

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{kb} + \frac{c}{b}$$

en donde:

x/m = Cantidad de P adsorbido por unidad de suelo.

K = Constante de energía de adsorción de P.

C = Concentración de P en la solución en equilibrio.

b = Capacidad máxima de adsorción de P.

$1/b$ = Pendiente de la isoterma.

7.8. Referencias

1. Bray, R.H. and L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, inorganic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.
2. Chang, S.C. and M.L. Jackson. 1957. Fractionation of phosphorus. Soil Sci. 84:133-144

3. Chapmen, H.D. and P.F. Pratt. 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters. Agr. Public., Univ. of Calif. Riverside.
4. Fassbender, H.W. 1966. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. *Fitotecnia Latinoamericana*. 3:203-206.
5. Fassbender, H.W. 1980. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA San José, Costa Rica.
6. Hsu, P.H. 1964. Adsorption of phosphate by aluminium and iron in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28:474-478.
7. Hsu, P.H. 1965. Adsorption of phosphate by aluminium and iron in acid soils. *Soil Sci.* 99:398-402.
8. Hunter, A. 1973. Methods commonly used for soil analysis in cooperating countries. International soil fertility evaluation and improvement project. North Carolina State University.
9. López-Hernandez, I.D. 1977. Química del fósforo en suelos ácidos. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
10. López, J.R. y López M. 1978. El diagnóstico de suelos y plantas. Métodos de campo y laboratorio. 3^{er} ed. Madrid, Mundiprensa. pp 337.
11. McQuaquer, N.R. and T. Fung. 1975. Determination of available sulfur and total sulfur in soils using fusion with alkali metal nitrates. *Anal. Chem.* 8:1462-1464.
12. Peterson, G.W. and R.B. 1966. A modified Chang and Jackson method for routine fractionation of inorganic soil phosphates. *Soil Sci. Amer. Proc.* 30:563-565.

13. Saiz del Río, J.F. y E. Bornemisza. 1961. Análisis químicos de suelos. Métodos de laboratorio para diagnóstico de fertilidad. IICA-CATIE, Turrialba, Costa Rica.