

**EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE FÓSFORO EN DOS SUELOS ÁCIDOS
DEL DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

PAOLA ANDREA ZAMARA REALPE

JARDIEL OBEIMAR BURBANO NAVA

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial
para optar el título de químico**

Directora: M.Sc. ISABEL BRAVO REALPE

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA**

2006

RESUMEN

El fósforo desempeña un papel importante en la nutrición de las plantas, considerándose junto al nitrógeno y el potasio, como uno de los elementos básicos para el normal desarrollo de los cultivos, ya que ocupa un lugar clave en el metabolismo de las plantas. En suelos ácidos como los del departamento del Cauca, este nutriente presenta problemas de disponibilidad puesto que se puede adsorber aniónicamente, sustituirse isomórficamente o precipitarse con el hierro o el aluminio presentes en este tipo de suelos.

Se caracterizan física y químicamente dos suelos uno suelo proveniente de La vereda La Aurelia municipio de Cajibío y otro de Senda Magines corregimiento de Cuatro Esquina municipio de EL Tambo (Departamento del Cauca). Se estudia la retención de P en los dos suelos, incubando muestras de ellos con diferentes dosis de KH_2PO_4 y de Triple 15 (Fertilizante ampliamente usado en esta región). Se evalúa inicialmente la cinética de retención para determinar el tiempo de equilibrio de adsorción - desorción. El P adsorbido se evalúa por diferencia entre el P suministrado y el P en solución determinado colorimétricamente a 660 nm ⁽¹⁾. En el tiempo de equilibrio se valora la retención mediante isotermas de adsorción de Langmuir a 25°C, obteniendo la máxima cantidad de adsorción y su máxima energía de retención ⁽²⁾, encontrándose diferencias significativas entre la retención y formas de adsorción en los dos suelos, atribuibles principalmente a la diferencia en los contenidos de MO, de arcillas y de Al entre ellos.

Se encuentra además que la retención del P proveniente del KH_2PO_4 es superior a la proveniente del triple 15 en los dos tipos de suelos.

Por otra parte, se hace un fraccionamiento de las diferentes formas de fósforo en el suelo mediante el procedimiento secuencial de Chang y Jackson ⁽³⁾ y estandarizado por Marquínez y Potosí ⁽⁴⁾. Se evaluó las fracciones y se determina la mayor capacidad de adsorción de fósforo. Se encuentra que la fortificación con las dos fuentes de P en los dos suelos produce cambios significativos en dicho fraccionamiento para ambos suelos.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El fósforo (P), considerado como elemento esencial en el crecimiento de las plantas, no puede ser sustituido por ningún otro elemento. Interviene en la formación de nucleoproteínas, ácidos nucleicos y fosfolípidos; los componentes fosfatados desempeñan un papel importante en la transformación de la energía química solar durante la fotosíntesis y provee de esta energía a los procesos de biosíntesis de las plantas. Dada su baja solubilidad en los distintos suelos, este elemento se constituye comúnmente en la clave que limita la nutrición de los cultivos en suelos y aguas.

Los suelos del departamento del Cauca en su mayoría son de naturaleza fuertemente ácida afectando así la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales para los cultivos, pero principalmente la del fósforo, ya que en este tipo de suelos este nutriente se adsorbe de diferentes formas sobre la fase coloidal, impidiendo así su disposición en la solución del suelo. Por esto, los agricultores se ven obligados a aplicar grandes y repetidas dosis de fertilizantes fuentes de este elemento, para obtener cosechas satisfactorias (en el caso del café, se aplican 500 kg de 17-6-18-2 por Hectárea tres veces al año) afectando así, cada vez más el rendimiento económico de los cultivos y acumulando dosis apreciables en el suelo que posteriormente pueden pasar a niveles freáticos y cuerpos de agua por solubilización y percolación, donde se produce contaminación por procesos de eutrofización.

Los distintos sistemas agropecuarios influyen sobre el estado de P en el suelo según la naturaleza, intensidad y frecuencia de: 1) cultivo y labranza, 2) cosecha y productos removidos, 3) erosión y lavado, 4) manejo y aplicación de fertilizantes; siendo su disponibilidad para las plantas, una función de la cantidad y formas de P presentes en el suelo.

Por esto, con este trabajo se pretende evaluar la adsorción de P en dos suelos del departamento del Cauca ambos fuertemente ácidos pero con características diferentes desde el punto de vista de formación, cultivo, labranza, etc. Para ello se harán estudios mediante Isotermas de Langmuir con el propósito de evaluar su forma y su máxima retención, para poder tomar correctivos posteriormente.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la adsorción de Fósforo a partir de diferentes fuentes, mediante isoterma de Langmuir y correlacionarla con las diferentes fracciones de P en dos suelos ácidos del Departamento del Cauca.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y químicamente los dos suelos a estudiar.
- Construir isotermas de Langmuir previa evaluación de las cinéticas de adsorción en los dos suelos.
- Determinar la máxima capacidad de adsorción de P en los dos suelos del departamento del Cauca.
- Evaluar las diferentes fracciones de P en los dos suelos.
- Establecer la correlación entre la adsorción y fracciones de P.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El suelo es un sistema complejo en donde coexisten en estrecho equilibrio tres fases: una fase sólida, una líquida y una gaseosa. La fase sólida de la mayoría de los suelos está constituida principalmente por sustancias inorgánicas de diferente composición química. Algunas de ellas son mezclas de compuestos a las que se denominan rocas, cuya meteorización conduce a los minerales primarios y secundarios formadores del suelo.

La fase líquida del suelo se define como una solución que posee equilibrio de electrolitos y que ocurre en condiciones de suelos no saturados por agua. Esta solución es de gran importancia para la nutrición de las plantas. En ella se encuentran presentes todos los nutrientes necesarios para los diferentes cultivos como nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, cobre, cinc, hierro, manganeso, entre otros; también contiene moléculas orgánicas solubles de peso molecular reducido. Las concentraciones de estos elementos en la solución del suelo dependen de las propiedades físicas y químicas de este, como la presencia y solubilidad de sus componentes inorgánicos y orgánicos, su temperatura y la presión de los diferentes gases en su atmósfera.

La fase gaseosa varía ampliamente en los suelos y comúnmente ocupa volúmenes que oscilan de 0 a 45% del volumen total de ellos. Sus componentes principales son los mismos que los del aire en la atmósfera: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua y los gases inertes ⁽⁵⁾.

3.1. SUELOS ANDISOLES

Los Andisoles o Andosoles son suelos desaturados de insolubilización rápida de complejos órganominerales, son ricos en alófanos y fuertemente ácidos. En Colombia están ampliamente distribuidos en la región Andina del país, especialmente en la cordillera Central. En las cordilleras Occidental y Oriental también se presentan, pero comparativamente con la Central, en menor proporción. Las características generales y dominantes del medio natural donde se presentan estos suelos están influenciadas por la presencia de cenizas volcánicas, especialmente en aquellas zonas muy húmedas y pluviales, que constituyen pisos altitudinales que varían entre el Premontano (24°C) hasta el Montano (6-12°C) y donde los regímenes de humedad del suelo son muy altos. Los materiales orgánicos se presentan en cantidades muy altas (1.5-6% C.O). la erosividad varía de acuerdo con las cordilleras, predominando la media y alta en la Central y Occidental y las muy bajas en la Oriental.

El material parental predominante de los Andisoles del país es el piroclástico y fundamentalmente el de las cenizas volcánicas.

La morfología caracteriza por manifestar horizontes **A** espesos (30 – 50 cm aproximadamente), color pardo a pardo amarillento, estructura grumosa y granular fina, alta porosidad total, densidades aparentes bajas, estabilidad estructural alta, permeabilidad y movimiento del agua altos por lo cual las pérdidas de elementos también lo son, altos contenidos de materiales orgánicos que tienden a favorecer la formación de complejos Al-humus.

Dentro de las características químicas resaltan los valores de pH ácidos y fuertemente ácidos, las bajas saturaciones de bases, las altas capacidades de intercambio, la alta retención fosfórica, al igual que los valores altos en materiales orgánicos, con dominancia de compuestos de bajo grado de polimerización y abundantes huminas.

Las características y propiedades de los Andisoles y su localización, muchas veces en condiciones de pendientes pronunciadas y alta humedad, los hace susceptibles a la degradación estructural y a la erosión en sus diferentes manifestaciones, en especial cuando se han eliminado la cobertura del bosque o el sombrío en los cafetales ⁽⁶⁾.

3.2. EL FÓSFORO

El fósforo (P), es un elemento químico no metálico multivalente perteneciente al periodo 3 y al grupo del nitrógeno (grupo 15 o VA) en la tabla periódica. Su número atómico es 15 y su configuración electrónica de valencia es $3s^2 3p^3$, se encuentra en la naturaleza combinado en fosfatos inorgánicos y en organismos vivos pero nunca en estado nativo. Es muy reactivo y se oxida espontáneamente en contacto con el oxígeno atmosférico emitiendo luz, dando nombre al fenómeno de la fosforescencia ⁽⁷⁾.

Entre los tres elementos principales (N, P, K), el fósforo es requerido por las plantas generalmente en menores cantidades; sin embargo, su estudio ha adquirido la mayor importancia a causa de la baja disponibilidad de este elemento en la mayoría de los suelos agrícolas del mundo, debido no solo a que su contenido total es bajo, sino a las múltiples reacciones que ocurren en el suelo llevándolo a formas no asimilables ⁽⁸⁾.

El fósforo es un componente esencial de los vegetales, cuya riqueza media en fosfato (P_2O_5) es del orden del 0,5 al 1 % de la materia seca, interviene activamente en la mayor parte de las reacciones bioquímicas complejas de la planta que son la base de la vida: respiración, síntesis y descomposición de glúcidos, síntesis de proteínas, actividad de las diastasas, etc. ⁽⁸⁾.

El papel fundamental del fósforo en las transferencias de energía ha sido bien comprobado. Los iones fosfato son capaces de recibir energía luminosa captada

por la clorofila y transportarla a través de la planta. También tiene una gran importancia en el metabolismo de diversas sustancias bioquímicas.

El fósforo en el suelo, se encuentra en unos 200 minerales distintos, muchas veces en forma de fosfatos simples o mixtos. Sus principales menas son: Fluorapatito, $(3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF})$ y la Francolita $(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2 \cdot n\text{CsCO}_2)$: Son una variedad en la que parte del flúor está sustituido isomórficamente por cloro; el Carbonato-Hidroxil-Fluórapatito, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH},\text{F})_{2-x}\text{CaCO}_2$.

La acción de las sustancias orgánicas es responsable en gran medida de la formación del suelo y existen motivos para considerar que los pioneros en dicho proceso son los microorganismos, los cuales constituyen un eslabón fundamental en el ciclo del hierro, azufre, calcio, silicio, fósforo, y otros elementos.

Muchos investigadores han descrito la transformación de los fosfatos poco solubles (fosforitas y otros fosfatos de calcio), en formas disponibles para las plantas ⁽⁹⁾.

El aumento del contenido de materia orgánica puede incrementar la disponibilidad del fósforo en el suelo, al competir con el ión fosfato, pues ocupa los centros activos en las reacciones de adsorción polar (debido a su carácter aniónico), por lo que provoca una disminución de la fijación del fósforo.

Otra fuente importante de la materia orgánica se relaciona con la acción indirecta que ejerce sobre el mecanismo de aluminio. Los ácidos orgánicos producidos por su descomposición acidifican el medio, con lo cual solubilizan cantidades mayores de hierro y aluminio y aumenta la posibilidad de fijación del fósforo por estos elementos. Por otra parte, los hidroxiacidos formados (tartárico, málico, malónico y cítrico) son capaces de formar quelatos con el hierro y aluminio e impiden que estos elementos insolubilizan los fosfatos presentes en el medio ⁽¹⁰⁾.

Durante la meteorización química, los óxidos de hierro precipitan en las superficies de los fosfatos de hierro, fosfatos de aluminio y fosfatos de hierro-aluminio, quedando ocluidos estos en los óxidos de hierro. Estos fosfatos también se encuentran en capas superficiales adsorbidas o precipitadas sobre arcillas de hidróxidos ó aluminio-silicatos.

Los fosfatos de calcio pueden encontrarse como tal, adsorbidos en las superficies de los carbonatos cálcicos y ocluidos en él.

Durante las grandes transformaciones de los minerales primarios el hierro prevalece como elemento y se acumula en el suelo siendo por tanto uno de los elementos mas dinámicos al estar presente junto con el aluminio en formas amorfas y cristalinas, influyendo en gran medida en los procesos de fijación del fósforo; de ahí que muchos autores hallan correlacionado la capacidad de fijación de fósforo con los contenidos de compuestos de hierro y aluminio, tanto libre como en formas de óxidos, hidróxidos amorfos y cristalinos ⁽¹¹⁾.

La textura guarda gran relación con el contenido de arcilla que es el componente que está más asociado con la retención de los fosfatos en el suelo y se ha demostrado que en los suelos arenosos existe movimiento del fertilizante fosfórico soluble a través del perfil.

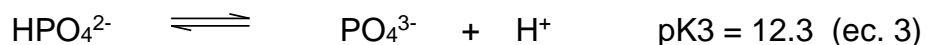
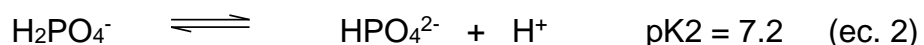
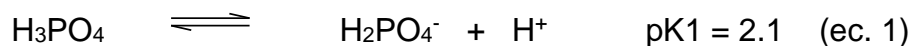
Resulta importante destacar que la textura determina la velocidad de difusión de los iones fosfato hacia el interior del suelo, por contener los suelos de textura gruesa un menor porcentaje en volumen de agua que los de textura fina, reduciéndose por tanto la difusión de fósforo, aunque hay que considerar un factor importante: La formación de concentraciones ferruginosas o perdigones en algunos suelos tropicales, lo que le confiere a los suelos de textura gruesa una alta capacidad de fijación de fósforo ⁽¹²⁾.

Los minerales arcillosos retienen los iones fosfatos de manera más intensa en un medio ácido, mediante el intercambio con los grupos OH⁻, obteniéndose valores de absorción de 7.7 a 9.7 meq de fosfato para diferentes minerales arcillosos (Ilita, Caolinita, Bentonita) ⁽¹³⁾.

3.2.1. Formas del Fósforo en el Suelo

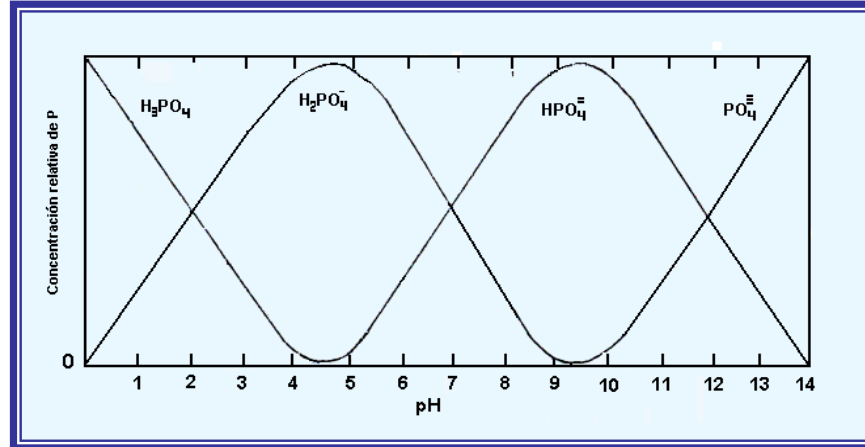
El fósforo del suelo se presenta casi exclusivamente como orto fosfatos derivados del ácido fosfórico, H₃PO₄, y representado como P₂O₅. La riqueza del suelo nativo en fosfato, depende fundamentalmente de la naturaleza de la roca madre que la originó.

La química del fósforo está relacionada con las formas iónicas del ácido fosfórico (H₃PO₄). Este ácido tiene tres constantes de disociación según las ecuaciones 1, 2 y 3:



El predominio de una u otra de las formas iónicas depende del pH. La figura 1 muestra la concentración relativa de fosfatos en sus distintas formas iónicas, en función del pH. Se observa que a valores de pH comprendidos entre 4.5 y 7.0 (comunes en los suelos), las formas dominantes son H₂PO₄⁻ y HPO₄⁼ ⁽⁸⁾.

Figura 1. Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH



El P en el suelo puede estar fijado sobre el complejo arcillo-húmico y sobre las arcillas insolubilizándolos y volviéndolos no disponibles para la planta. La mayor parte del fósforo del suelo se encuentra en forma insoluble. El Fosfato en la solución del suelo representa la fracción más pequeña, pero a la vez la más importante para la planta, debido a que son estos aniones disueltos los que ella absorbe.

Los compuestos de P formados pueden encontrarse en forma de sales en solución, sales cristalinas o sales adsorbidas por los coloides del suelo. El ion fosfato puede, además, ser directamente adsorbido por los coloides del suelo o puede formar enlaces de gran estabilidad con los hidróxidos de Fe, Al o Mn que forman parte de los coloides del suelo. Estos últimos constituyen el "fósforo fijado".

Los fosfatos del suelo se pueden dividir en dos grandes grupos: inorgánicos y orgánicos. En los inorgánicos los iones hidrógeno del ácido fosfórico se reemplazan por cationes, formando sales ⁽⁵⁾. Los fosfatos orgánicos comprenden varios tipos de moléculas.

3.2.1.1. Fósforo inorgánico

Las principales formas de fósforo inorgánico se muestran en la Tabla 1. Todas ellas son de menor solubilidad que los compuestos fosfatados orgánicos.

Tabla 1. Principales Formas de Fósforo Inorgánico

Fosfatos	Denominación	Composición	Características
Calcio	hidroxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{Ca}(\text{OH})_2$	mayor abundancia
	oxiapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{CaO}$	
	fluorapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{CaF}_2$	mayor abundancia
	carbonatoapatita	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{CaCO}_3$	
	fosfato tricálcico	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	
	fosfato bicálcico	CaHPO_4	mayor solubilidad
	fosfato monocálcico	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	mayor solubilidad
Hierro	vivianita	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	
	estrengita	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Aluminio	variscita	$\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	

Adaptado de Tsai y Rosetto, 1992, (14)

➤ **Fosfato insoluble de la roca madre (mineral primario)**

Representa una gran parte del fosfato total del suelo. En esta forma esta completamente no disponible para la planta. Constituye una reserva a largo plazo, la cual solo puede volverse disponible mediante procesos de meteorización a través de lentas y prolongadas transformaciones físicas químicas y biológicas ⁽¹⁵⁾.

➤ **Fosfato precipitado o en forma de compuestos inorgánicos poco solubles**

En suelos ácidos predominan los fosfatos precipitados de hierro y aluminio; en suelos calizos los fosfatos de calcio principalmente en forma de apatita.

Los fosfatos de calcio comprenden una variedad de compuestos que varían en su solubilidad desde relativamente solubles como monofosfatos y difosfatos de calcio presentes en cantidades pequeñas y las apatitas (hidroxi y fluoroapatitas) prácticamente insolubles. Los fosfatos de hierro y aluminio varían también ampliamente en solubilidad dependiendo de la cantidad de fósforo presente. En los suelos ácidos es posible también la formación de sesquióxidos y sobre esto la formación de la estrengita y la variscita ⁽¹⁵⁾.

Entre los fosfatos inorgánicos se pueden distinguir formas químicamente bien definidas y cristalizadas, y otras no bien cristalizadas o amorfas, como los fosfatos adsorbidos y presentes en la solución del suelo.

Entre los fosfatos cristalinos se considera a los cálcicos, a los aluminicos y a los férricos, entre los primeros, son de importancia: el fosfato monocálcico, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$; el fosfato dicálcico, CaHPO_4 , y sus formas hidratadas,

$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; las apatitas hidroxidadas, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$ y sus variedades fluorada y carbónica. Entre los segundos se destacan: el fósforo alumínico (variscita, $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y los fosfatos férricos o ferrosos (livianita, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, y estrengita, $\text{Fe}_4\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Existen también fosfatos cristalinos complejos, derivados de la transformación de fertilizantes, como taranakitas, fosfatos octacalcicos, gorceixita, cranealita y otros ⁽⁵⁾.

Por otro lado se deben considerar formas químicamente no bien definidas, no bien cristalizadas o amorfas, como los fosfatos adsorbidos al complejo coloidal y los ocluidos en los hidróxidos de Al, Fe y Mn a través de su proceso de cristalización y crecimiento. Estos fosfatos se denominan, generalmente, fosfatos ocluidos o inertes ⁽⁵⁾.

En suelos ácidos, el fósforo se encuentra como fosfatos de hierro y aluminio, mientras que en alcalinos los fosfatos cálcicos adquieren mayor importancia. En suelos de pH elevado, la actividad del calcio controla la solubilidad del fósforo. Las relaciones encontradas indican que el H_2PO_4^- de los fosfatos de calcio es insoluble en suelos alcalinos, pero soluble en medios ácidos ⁽⁸⁾.

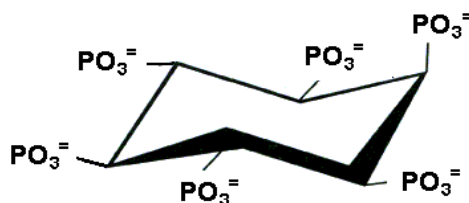
3.2.1.2 Fósforo orgánico

El nivel de fósforo orgánico en los suelos puede generalmente variar entre 25 y 75%, en casos extremos estos límites pueden extenderse hasta 3 y 85% del fósforo total. Estas variaciones en el contenido de fósforo orgánico dependen de diversos factores tales como la temperatura, precipitación pluvial, acidez del suelo, grado de desarrollo, material parental y drenaje entre otros ⁽¹⁵⁾.

De acuerdo con la estructura química en la materia orgánica existen cinco tipos principales de compuestos fosfatados:

- **Fosfatos de inositol.** Son moléculas resultantes de la esterificación del inositol con grupos fosfato. Estos compuestos representan entre un 30 y 80% del fósforo orgánico del suelo; el más común es el hexafosfato de inositol cuya fórmula estructural se muestra en la figura 2.

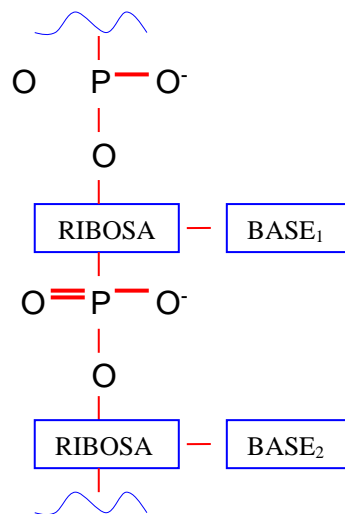
Figura 2. Estructura del hexafosfato de inositol



Los fosfatos de inositol son importantes componentes de granos de cereales en forma de fitatos de calcio y magnesio, denominados fitina. Los hexafosfatos de inositol encontrados en el suelo pueden ser también de origen microbial, puesto que varios microorganismos pueden sintetizar esta molécula. En las plantas pueden encontrarse además ésteres de inositol con uno a cinco fosfatos, aunque el hexafosfato es el más abundante ⁽¹⁵⁾.

- **Ácidos nucleicos.** En los suelos los microorganismos sintetizan sus propios ácidos nucleicos a partir de pentosas, bases púricas y pirimidínicas y grupos fosfatos. Por acción de las fosfatasa se libera fosfato al suelo. La participación de los ácidos nucleicos en el aporte de fósforo orgánico al suelo, puede llegar hasta un 65% del total del fósforo orgánico, aunque en general, el porcentaje de fósforo derivado de ácidos nucleicos no pasa de 3% como lo indican varios reportes. La velocidad de transformación de los ácidos nucleicos en microorganismos es rápida, depende principalmente de la acidez del suelo ⁽¹⁵⁾. En la figura 3 se muestra una representación de los ácidos nucleicos.

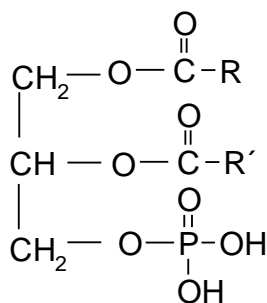
Figura 3. Representación de los ácidos nucleicos



- **Fosfolípidos.** Es la tercera forma de compuestos orgánicos de fósforo en el suelo. Son moléculas anfipáticas porque en su estructura poseen regiones no polares debidas a cadenas hidrocarbonadas de ácidos grasos y regiones polares de las que hace parte el grupo fosfato. La cantidad total de fosfolípidos en el suelo es en general menor de 5µg/g. Los fosfolípidos representan entre el 0.5 y el 7% del fósforo orgánico con un valor medio del 1% ⁽¹⁵⁾. En las membranas celulares juegan un papel muy importante, ya

que controlan la transferencia de sustancias hacia el interior o exterior de la célula. Una de las características de los fosfolípidos es que una parte de su estructura es *soluble en agua* (hidrofílica), mientras que la otra, es *soluble en lípidos* (hidrofóbica). La parte hidrofílica es en la que se encuentra el aminoalcohol o base nitrogenada. Esta característica estructural hace posible que los fosfolípidos participen en el intercambio de sustancias entre un sistema acuoso y un sistema lipídico, separando y aislando a los dos sistemas, a la vez que los mantiene juntos. Su fórmula general se relaciona en la figura 4.

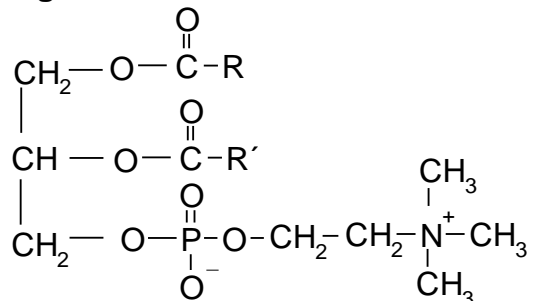
Figura 4. Fórmula general de los fosfolípidos



- **Fosfatos metabólicos.** Para que puedan ser utilizados, deben combinarse con el ácido fosfórico y producir el desdoblamiento de la glucosa que proporciona energía y la contracción muscular, la cual exige la combustión de los azúcares. El fósforo permite así a la glucosa transformarse en ácido láctico con desprendimiento de energía. Los compuestos fosfóricos favorecen la absorción de las grasas a nivel del intestino. Por otra parte aseguran el transporte de los ácidos grasos de que tiene necesidad el organismo, después de haberlos transformado en lecitinas.

La lecitina es una Fosfatidilcolina cuya fórmula se relaciona en la figura 5.

Figura 5. Estructura de la Lecitina

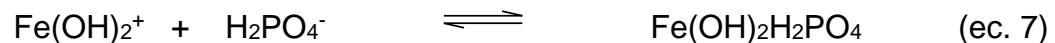
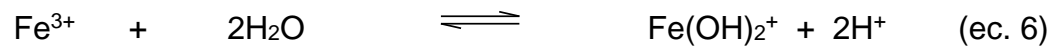
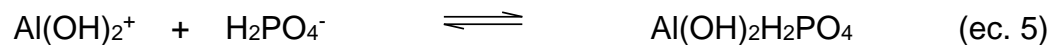
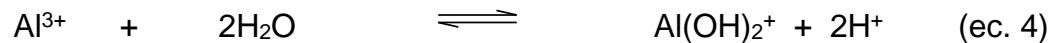


3.2.2. Transformaciones Químicas del Fósforo en el Suelo

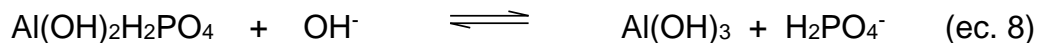
La dinámica del fósforo en el suelo depende en gran medida de la acidez del suelo medida por su pH y por la concentración de iones como Al, Mn, Fe y Ca. La forma del ión fosfato en solución varía con el pH.

De acuerdo a la disociación del ácido fosfórico y a la ecuación de Henderson Hasselbach: $\text{pH} = \text{pKa} + \log \text{B/A}$, donde B y A son las bases y ácidos conjugados respectivamente, puede deducirse que a pH 6 un 94% del fósforo soluble, se encontrará como H_2PO_4^- , pero a pH 7 sólo el 60% estará en esta forma.

Cuando el pH baja, el fosfato se fija dando lugar a compuestos insolubles de fósforo con hierro y aluminio. La fijación es mayor a valores de pH menores a 5. Algunas reacciones de insolubilización del fosfato con cationes de hierro y aluminio se presentan en las ecuaciones 4 a 8:



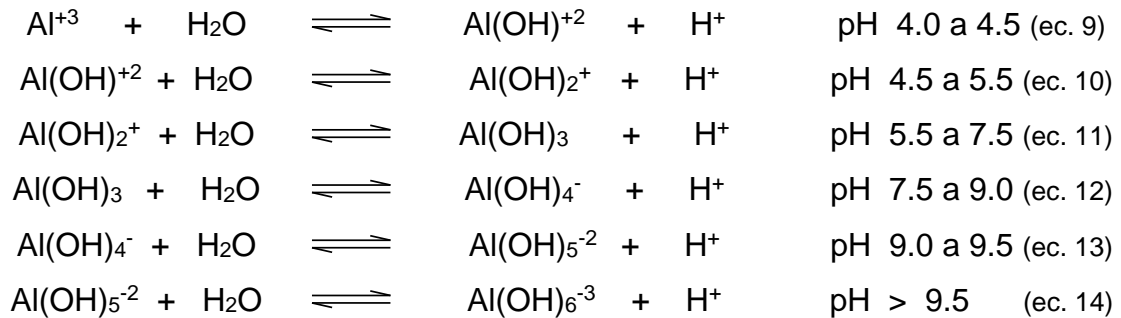
Al aumentar el pH por encima de 5.5, el fósforo se hace más soluble aumentando su disponibilidad y se expresa mediante la ecuación 8:



Los fosfatos de aluminio y hierro tienden a acumularse en suelos ácidos, mientras que los fosfatos de calcio predominan en suelos alcalinos. El rango de pH de 6 a 7 es el mejor desde el punto de vista de disponibilidad de este elemento para la planta, ya que en este rango el aluminio y el hierro están precipitados como hidróxidos y el fosfato está en solución. Por encima de pH 7, los fosfatos de calcio se vuelven insolubles ⁽¹⁵⁾.

El comportamiento del aluminio en el suelo condiciona las características de los suelos ácidos. La existencia en forma soluble de las distintas especies de aluminio depende del intervalo de pH del suelo y de la fuerza iónica. Existen formas intercambiables: el Al^{3+} , y las resultantes de su hidrólisis, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})^+$. Formas precipitadas como el $\text{Al}(\text{OH})_3$, y formas aniónicas tales como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Al}(\text{OH})_5^{2-}$ y $\text{Al}(\text{OH})_6^{3-}$ ⁽¹⁶⁾.

El origen de la acidez del suelo se halla en la hidrólisis de los iones aluminio en todo el rango de pH como se demuestra en las siguientes ecuaciones 9 a 14.



3.2.3. Fijación de Fósforo

El proceso por el cual los fosfatos solubles, generalmente aplicados en forma de fertilizante, pasan a formas menos solubles a través de su reacción con partículas orgánicas e inorgánicas del suelo, se conoce como retención o fijación de fósforo. Como consecuencia, se restringe la movilidad del fósforo en el suelo y disminuye su posibilidad de ser absorbido por las plantas ⁽⁸⁾.

La deficiencia de fósforo en algunos suelos constituye una de las limitantes nutricionales de trascendencia en la producción de algunos cultivos. La importancia de este hecho está ligada no sólo al bajo contenido de fósforo disponible, sino también a la capacidad de fijar el fósforo proveniente del fertilizante a formas altamente insolubles ⁽¹⁷⁾.

La fijación comprende reacciones de adsorción y de precipitación, predominando una u otra forma según la concentración en la solución de equilibrio, el tiempo de reacción y los minerales constituyentes, no siendo posible diferenciarlos analítica ni matemáticamente ⁽¹⁸⁾.

En suelos ácidos, la adsorción de fósforo está generalmente atribuida a los "óxidos" e "hidróxidos" de hierro y aluminio y a otras propiedades del suelo. Este fenómeno ha sido estudiado a través de isotermas de adsorción ajustada a modelos matemáticos como los de Langmuir ó Freundlich. Se propone un tratamiento similar al de la ecuación de Langmuir de dos superficies, desarrollado por *Sposito* ⁽¹⁹⁾, haciendo uso de una combinación de ambas ecuaciones.

Se ha encontrado una relación estrecha entre la acidez del medio y la fijación de los fosfatos. El decrecimiento del pH está asociado con la formación de compuestos de hierro y aluminio difícilmente solubles, mientras que el aumento del pH se asocia con la formación de fosfatos cálcicos y en menor proporción de

fosfatos magnésicos. Cuando la reacción es ligeramente ácida a neutra, los fosfatos solubles pasan fundamentalmente a fosfato tricálcico y con el tiempo a moroxilapatita, que es la forma más estable de los fosfatos minerales ⁽¹¹⁾.

3.2.3.1. Mecanismos de precipitación de fosfatos de calcio

Cuando caen al suelo húmedo granos de fosfato monocálcico o superfosfato triple, estos gránulos se rodean de agua y comienzan a disolverse; paralela a la disolución hay también una reacción química en la cual el fosfato monocálcico se convierte a fosfato dicálcico hidratado y ácido fosfórico como se muestra en la ecuación 15:



Con la producción de H_3PO_4 y de fosfato dicálcico, se baja el pH del sistema a 1.01. El fosfato de calcio se deshidrata y se alcanza un estado estable de equilibrio entre los tres fosfatos conocido como “solución del punto triple” (STP) en el que coexisten: fosfatos monocálcico, dicálcico y ácido fosfórico.

Debido a la alta acidez y a la expansión de la solución que contiene los fosfatos, se van disociando sales del suelo y liberando cationes como Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , NH_4^+ . La interacción del sistema de fosfatos con el suelo circundante y con los cationes, incrementan el pH y presentan reacciones entre fosfatos y cationes que origina la precipitación de fosfatos cristalinos o amorfos pocos solubles de Ca, Fe y Al.

En suelos que van de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos, las sales de fosfato que predominan son los difosfatos de calcio, y de magnesio dihidratados, quedando durante mucho tiempo en forma asimilable para todos los cultivos, pero luego comienzan una sustitución gradual del protón en estos difosfatos formando trifosfato de calcio y magnesio respectivamente y otros fosfatos de mayor basicidad, (ecuaciones 16 -17).



Estas sales se precipitan en estado amorfo y su fosfato todavía es susceptible de solubilización en ácidos ligeros, quedando en forma parcialmente asimilable por las plantas ⁽¹⁵⁾.

3.2.3.2. Sustitución isomórfica

Los iones fosfatos (número de coordinación 4), encajan bien en los sitios ocupados por los tetraedros de silicio de los silicatos. Es de esperarse que cuando se aplican fosfatos al suelo ocurra algún grado de sustitución de fósforo por sílice en los enrejados arcillosos.

Otra forma de sustitución isomórfica se presenta al intercambiarse el ión fosfato, por iones hidroxilo en el enrejado de los minerales. En este caso hay desprendimiento de OH⁻ y el pH tiende a subir. Las ecuaciones 18 y 19 propuestas por Fox⁽²⁰⁾, para hidróxidos de hierro en oxisoles, ilustran este fenómeno:



En el primer caso se origina OH⁻ y en el segundo H₂O y carga negativa libre. Este fenómeno explica el aumento de carga negativa cuando se fosfatan suelos⁽⁸⁾.

3.2.3.3. Reacciones de doble descomposición

Estas reacciones involucran la formación de precipitados de fosfatos de hierro, aluminio y calcio en los cuales el producto de solubilidad juega un papel importante⁽¹⁵⁾.

3.2.3.4. Adsorción superficial

La adsorción de fósforo sobre la superficie de los coloides del suelo (materia orgánica, arcillas, hidróxidos), ha sido evaluada utilizando las "isotermas de adsorción", que describen la adsorción de gases sobre superficies sólidas⁽¹⁸⁾.

Una de estas isotermas es la de Freundlich, cuya formula general es: $y = KC^{1/n}$; en donde "y" es el fósforo adsorbido por unidad de peso de suelo; "C" es la concentración de fósforo en la solución de equilibrio; y "K" y "n" son constantes empíricas de cada sistema. Esta ecuación es aplicable en un rango de concentración de fósforo en la solución de equilibrio, pero no permite el cálculo de la máxima capacidad de adsorción.

La más utilizada de las isotermas es la de Langmuir, la cual establece que siempre que un gas esté en contacto con un sólido habrá un equilibrio establecido entre las moléculas en la fase de gas y las especies fijadas por adsorción correspondientes (las moléculas o los átomos) que están limitadas a la superficie del sólido ⁽¹⁾.

Como con todos los equilibrios químicos, la posición del equilibrio dependerá de un número de factores:

1. Las estabildades relativas de las especies involucradas en la adsorción y la fase gaseosa.
2. La temperatura del sistema (el gas y superficie, aunque ambos son normalmente iguales).
3. La presión del gas sobre la superficie.

En general, los factores (2) y (3) ejercen efectos opuestos en la concentración de la especie fijada por adsorción, es decir, que *la cobertura superficial* puede ser aumentada levantando la presión de gas pero será reducida si se levanta la temperatura superficial ⁽²¹⁾.

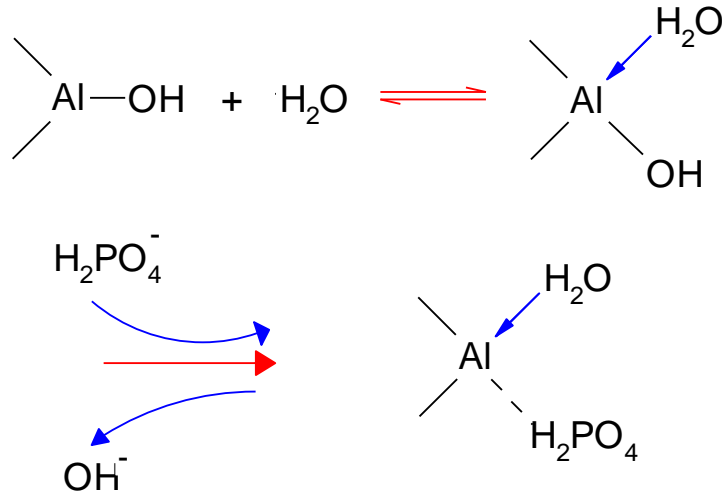
➤ **Adsorción de fósforo por minerales arcillosos**

Los minerales arcillosos que entran en la composición de los suelos, adsorben el anión fosfato con mayor fuerza a un pH ácido. Existe una correlación directa entre la adsorción de fósforo y el contenido de arcilla del suelo, pero los distintos tipos de arcilla varían en la capacidad de adsorción de fosfatos.

Entre las arcillas con mayor capacidad de adsorción está la caolinita (1:1) probablemente debido a su mayor contenido de grupos Al-OH expuestos en la superficie. La capa de alúmina está cubierta de tetraedros solo por un lado, y a pHs bajos puede crearse una capa superficial positiva al formarse grupos $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$. En arcillas tipo montmorillonita (2:1) como la bentonita, la capa de alúmina está bloqueada en ambos lados por tetraedros de Si-O, disminuyendo así la posibilidad de adsorción de aniones.

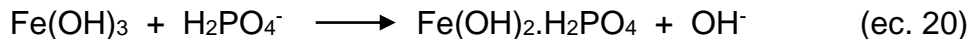
Las reacciones que se dan probablemente en una arcilla tipo caolinita, comprende la interacción de dos regiones OH del borde de la arista y una tercera se refiere a la oclusión superficial del fosfato en una zona amorfa de la superficie de la arcilla. La fase inicial en la fijación se cree que es la hidratación seguida de una sustitución de grupos Al-OH por fosfato de acuerdo a las reacciones que se muestran en la figura 7 ⁽²²⁾.

Figura 7. Adsorción de fósforo en minerales de arcilla 1:1



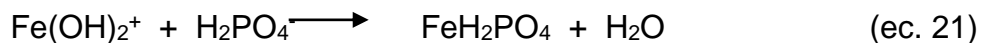
➤ **Adsorción de fósforo por compuestos de hierro y aluminio**

Los fosfatos pueden ser adsorbidos por hidróxidos de Al y de Fe, mediante reacciones parcialmente reversibles que originan, en el caso de Fe, fosfatos hidróxidos férricos, como se muestra en la ecuación 20:



El proceso de retención de fosfatos por óxidos de hierro, pueden ocurrir de varias maneras:

a. Retención química de fosfatos en las superficies protonadas OH_2^+ , como se muestra en la ecuación 21:

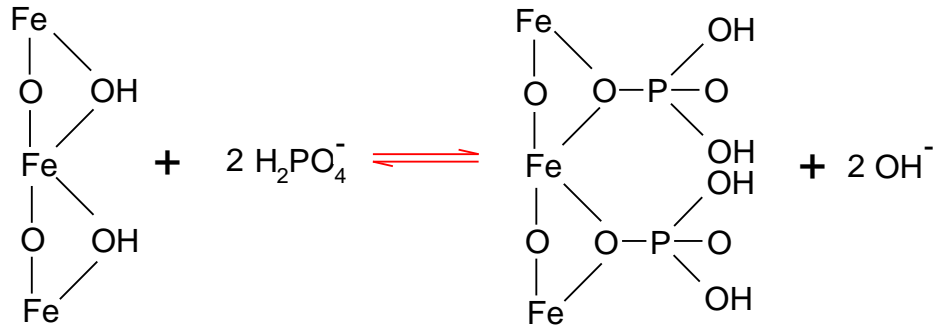


b. Retención química mediante sustitución de grupos OH de la superficie, como se muestra en la ecuación 22:



Estructuralmente la adsorción de fósforo sobre un mineral de óxidos de hierro, puede representarse como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Reacción de adsorción de fósforo sobre minerales de hierro



Al aumentar la acidez se rompe la estructura de los minerales arcillosos y se liberan al medio, iones Al^{3+} y Fe^{3+} , procedentes de óxidos e hidróxidos coloidales aumentando su reactividad y facilitando su precipitación con fosfatos.

➤ **Adsorción de fósforo por materiales amorfos tipo alófono**

Los suelos derivados de cenizas volcánicas comprenden una apreciable área de los suelos de Suramérica y Centro América. La fracción arcilla de estos andisoles está constituida principalmente por Alófono. El material alófono es prácticamente una transición antes de cristalizar en arcillas definidas tales como caolinita y montmorillonita. En este periodo de transición tiene la propiedad de liberar gran cantidad de aluminio el cual afecta seriamente el crecimiento de las plantas y disminuye drásticamente la disponibilidad de fósforo en el suelo.

El alófono confiere a los suelos una alta capacidad de retención de humedad y fijación de oxianiones como fosfatos y boratos ⁽¹⁵⁾.

3.2.4. Isoterma de Langmuir

Desarrollada por Irving Langmuir en 1916 para describir la dependencia de la cobertura superficial de un gas fijado por adsorción a la superficie y la presión del gas a una temperatura fija. Hay muchos otros tipos de isotermas (Temkin, Freundlich), las cuáles se diferencian en una o más de las asunciones hechas en derivar la expresión para la cobertura superficial; en detalle, en cómo tratan la dependencia superficial de la cobertura de la entalpía de la adsorción. Mientras que la isoterma de Langmuir es una de las más simples, todavía proporciona una interpretación útil en la dependencia de la presión en el grado de la adsorción superficial.

La cobertura superficial y las isotermas de adsorción, cuando se considera la de Langmuir, es convencional adoptar una definición de la cobertura superficial (θ) que define (saturación de la superficie). La cobertura superficial máxima de un adsorbato particular en una superficie dada siempre tiende a ser la unidad, es decir, $\theta_{\text{máximo}} = 1$.

Esta manera de definir la cobertura superficial se diferencia de ésta adoptada generalmente en la ciencia superficial, donde la práctica más común es igualar θ con el cociente de la especie del adsorbato a los átomos superficiales del substrato (que conduce a la saturación, las coberturas que son casi invariables menores que la unidad).

La isoterma de Langmuir se adapta bien a bajas concentraciones de fósforo en la solución de equilibrio (menores de 1mmol/L); permite calcular la constante relacionada con la energía de adsorción y la máxima capacidad de adsorción. En su forma lineal la ecuación 23 de Langmuir se expresa:

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{K \cdot b} + \frac{C}{b} \quad (\text{ec. 23})$$

En donde:

- C = Concentración de fósforo en la solución de equilibrio
- X = Cantidad de fósforo adsorbido por unidad de peso de suelo
- K = Constante relacionada con la energía de adsorción
- b = Máxima capacidad de adsorción
- 1/b = pendiente de la línea
- 1/K.b = Intercepto

Esta ecuación puede ser deducida de la ley de acción de masas. El siguiente es un ejemplo tomado de Corey, en el que **Z** representa el complejo coloidal del suelo y **A** son los aniones adsorbidos al complejo coloidal.

Se considera que Z-H₂PO₄ representa el fósforo adsorbido y equivale a **X** en la ecuación de Langmuir. Como la máxima capacidad de adsorción (**b**) esta representada no solo por **X**, si no también por Z-A, esta fase se puede sustituir por (**b-X**). La concentración de fósforo en la solución de equilibrio (**C**) se toma igual a la concentración de H₂PO₄⁻, como se muestra en las ecuaciones 24 y 25.



$$K = \frac{A^-}{C} \times \frac{X}{b - X} \quad (\text{ec. 25})$$

Al hacer las transposiciones necesarias para despejar C/X se obtiene la ecuación 26:

$$\frac{C}{X} = \frac{A^-}{Kb} + \frac{C}{b} \quad (\text{ec. 26})$$

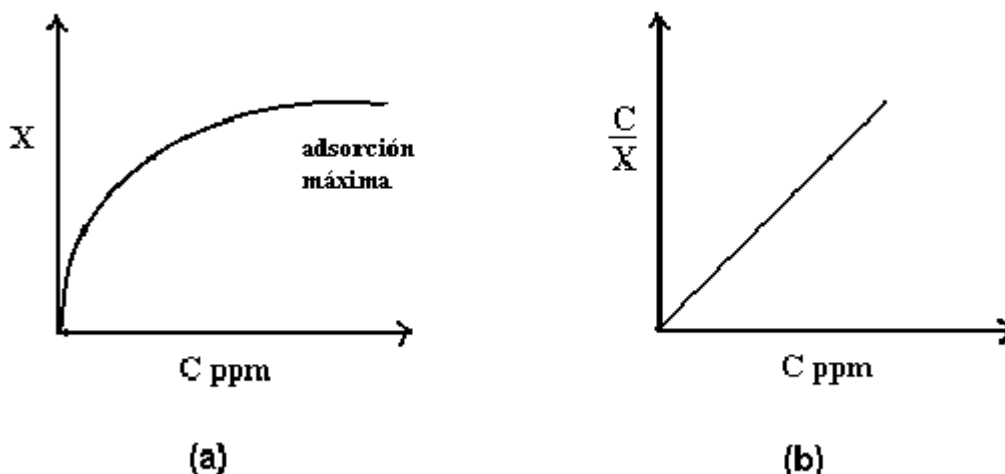
La cual es idéntica a la ecuación de Langmuir cuando A^- es constante. Esta ecuación indica que los fosfatos fijados sobre la superficie del coloide (Z), están compitiendo con los aniones (A^-) por los sitios de intercambio ⁽¹⁾.

Para determinar la adsorción de fosfatos el suelo se pone en contacto con soluciones de fósforo de concentración conocida; se agitan hasta que se establezca el equilibrio para luego determinar el fósforo en el líquido sobrenadante (valor **C** de la ecuación).

El fósforo adsorbido se calcula como la diferencia entre la concentración antes y después del contacto con el suelo; con este resultado se calcula el fósforo adsorbido por gramo de suelo (Y en la ecuación).

Al graficar la concentración de fósforo en la solución de equilibrio (**C**), contra el fósforo adsorbido (**X**), resulta una curva como la de la figura 9 (a), en la que se aprecia que hay una máxima capacidad de adsorción de fósforo cuando la curva se torna asintótica.

Figura 9. Representación gráfica de la adsorción de fósforo



Si se grafica C/X contra C , se obtiene una línea recta figura 9 (b), que corresponde a la isoterma de Langmuir. Los valores de b y K de la ecuación, se hallan estadísticamente al igualar $C/X = Y$ y $C = X$, en la ecuación de la recta ($y = a + bx$)⁽²⁾.

Es necesario notar, que la adsorción es un fenómeno que aumenta a medida que transcurre el tiempo de contacto entre el suelo y la solución por lo tanto, los resultados obtenidos varían con el tiempo de agitación de la muestra. En este sentido Fassbender, al realizar experimentos de adsorción en suelos de Costa Rica, encontró variaciones considerables al repetir el ensayo a diferentes tiempos de agitación. Para lo cual se obtuvo que a mayor tiempo de agitación, aumenta la máxima capacidad de adsorción (**b**); hecho que se traduce a una menor pendiente ($1/b$) de la línea, teniendo en cuenta la ecuación 23.

Algunos suelos ácidos, con gran capacidad para reaccionar con fósforo, no alcanzan el equilibrio en muchos meses. En la práctica debe preferirse un equilibrio aparente de 48 o 72 horas y usar un tiempo patrón para efectos de poder comparar suelos⁽⁵⁾.

Otro factor que debe tenerse en cuenta al hacer experimentos de adsorción de fosfatos, es la clase de sal utilizada; en este sentido Fox y Kamprath⁽²⁰⁾, recomiendan utilizar el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ en una solución de CaCl_2 0.01 M, por las siguientes razones: 1) El calcio es el catión más abundante en la mayoría de los suelos agrícolas; 2) El pH al momento de equilibrio se aproxima a las condiciones de campo; 3) Se obtiene un líquido sobrenadante claro, lo cual facilita el trabajo en el laboratorio. Por otra parte, los fertilizantes fosfóricos más usados son los fosfatos de calcio⁽²¹⁾.

3.2.5. Fraccionamiento de Fósforo

Para los especialistas en génesis de suelos, la caracterización de las formas de fósforo representa una valiosa ayuda, ya que en suelos poco evolucionados predominan los fosfatos de calcio, mientras que en los suelos de alta evolución el fósforo se encuentra unido al hierro y al aluminio. Los suelos de desarrollo intermedio poseen una proporción balanceada de fosfatos de calcio, hierro y aluminio.

Para el fraccionamiento de fósforo se han usado varias técnicas. Inicialmente se hacía la extracción de fosfatos por medio de ácidos y bases fuertes, sometiendo el suelo a extracciones sucesivas entre pH 1.5 y 12. Los valores de pH de las soluciones extractoras se obtenían por mezcla de diversas proporciones de NaOH y HCl. El método tiene el inconveniente de no diferenciar entre fosfatos de hierro y aluminio además alguna proporción de estas formas de fósforo, son solubles en medio ácido. El método desarrollado por *Chang y Jackson*⁽³⁾ reportada por

López ⁽²³⁾ con modificaciones tales como las de *Peterson y Corey* ⁽²⁴⁾ y *Williams y colaboradores* ⁽²⁵⁾ ha sido muy utilizado.

Este método usa NH_4F a pH 7 para extraer fosfatos de aluminio; NaOH para los fosfatos de hierro y H_2SO_4 para los fosfatos de calcio. Después de realizar estas tres extracciones en secuencia, se trata el suelo con agentes reductores (ditionito y citrato de sodio), para solubilizar el fósforo ocluido (atrapado entre concreciones de hierro y aluminio) ⁽²⁶⁾.

Posteriormente este método fue modificado en el sentido de usar NH_4F a pH 8.2, valor en el que se minimiza la disolución de fosfatos de hierro y calcio. Otra modificación, consiste en tratar la muestra con los agentes reductores antes de la extracción con H_2SO_4 , con lo cual se evita que fosfatos ocluidos de hierro y aluminio se reporten como fosfatos de calcio ⁽⁸⁾. Se asume básicamente que cada fracción específica, tiene un grado de asimilabilidad en distintos suelos; esta presunción necesita ser verificada en los distintos lugares y con distintos sistemas de manejo ⁽²⁷⁾.

4. METODOLOGÍA

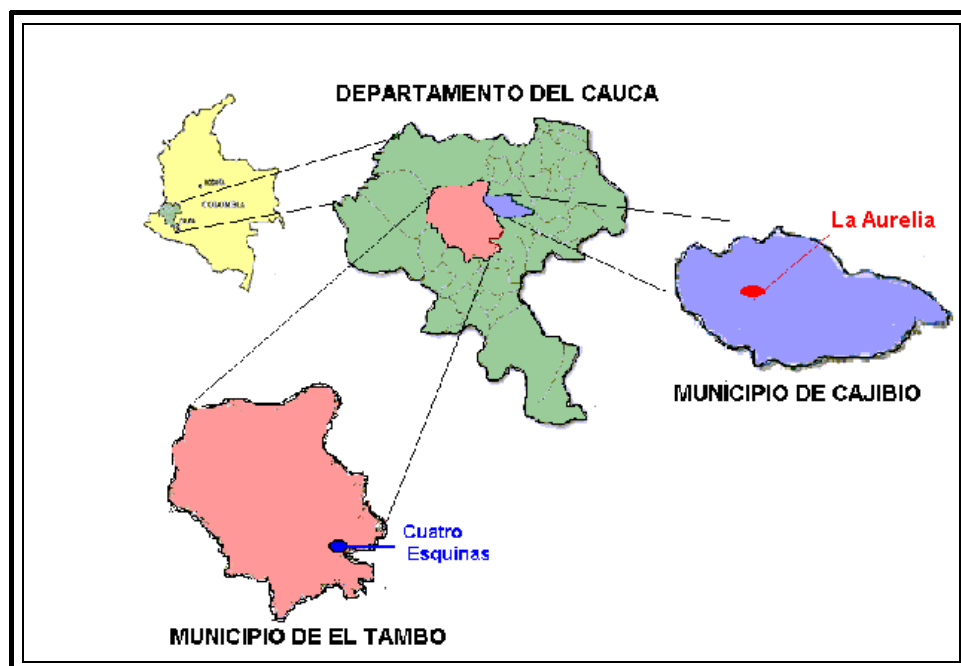
4.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

Con el propósito de observar la influencia de las propiedades físicas y químicas de los suelos sobre el proceso de adsorción, se seleccionan dos fincas con características diferentes en cuanto a propiedades físicas y químicas. Los suelos estudiados comprenden dos regiones ubicadas en los municipios de Cajibío y El Tambo, figura 10.

4.1.1. Finca Santa Rosa: Se encuentra ubicada en la vereda La Aurelia municipio de Cajibío, a 1740 metros sobre el nivel del mar, con una precipitación pluvial de 1500 mm a 19 grados centígrados

4.1.2. Finca La Lorena: Se encuentra ubicada en la vereda de Senda Magines, corregimiento de cuatro esquinas, municipio de El Tambo a 1340 metros sobre el nivel del mar.

Figura 10. Ubicación geográfica del corregimiento de Cuatro Esquinas y la vereda Aurelia del departamento del Cauca



4.2. TOMA DE MUESTRAS

Para obtener un valor analítico representativo del volumen del suelo se divide el terreno seleccionado en unidades de muestreo y se selecciona una de ellas alrededor de los cultivos. Para tomar las respectivas muestras, se delimita el área y se cruza en zig – zag, haciendo sondeos en la capa arable que comprende alrededor de 30 cm de profundidad. Se toman entre 10 y 15 submuestras y se forma con estas una muestra compuesta de 2 Kg. Las muestras compuestas se llevan al laboratorio, se secan al aire por 24 horas, se muelen y se pasan por tamiz de 2 mm.

4.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DEL SUELO

Con el objeto de identificar los suelos a estudiar, se realizan análisis físicos y químicos, de acuerdo a la metodología estandarizada en el Laboratorio de Agroquímica de la Universidad del Cauca ⁽²⁸⁾.

4.3.1. Análisis Físicos

★ Humedad

Se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. Se determina por el método gravimétrico pesando la muestra antes y después del calentamiento a 105 °C con el objeto de eliminar el agua superficial en una estufa con circulación de aire forzado.

★ Densidad real

Se determina mediante el método del picnómetro, que consiste en determinar la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un frasco de volumen conocido.

★ Textura

Se refiere a las proporciones de arena, limo y arcilla (partículas menores de 2 mm de diámetro) que se encuentran en una masa de suelo. Se determina mediante el método de Bouyoucos que consiste en determinar la cantidad de sólidos en suspensión por medio de un Hidrómetro. La profundidad del centro de flotación del Hidrómetro varía con la densidad de la suspensión y también con la textura.

Después de 40 segundos, todas las partículas mayores de 50 micras sedimentarán de tal manera que no tendrán influencia sobre el hidrómetro. Las lecturas realizadas una hora después, corresponden a partículas mayores de 5 micras y a las dos horas a partículas menores de 2 micras.

4.3.2. Análisis Químicos

Los análisis químicos comprenden las siguientes determinaciones:

★ **pH**

Se determina mediante el método potenciométrico, en una suspensión suelo: agua en relación 1:1 por medio del pH – metro METROHM E-744 con electrodo combinado de vidrio.

★ **Acidez intercambiable**

Se determina mediante el método de desplazamiento con una solución neutra de KCl, que consiste en desplazar los iones H^+ y Al^{+3} del suelo por agitación de la muestra de suelo con una solución neutra de KCl. Los iones desplazados son titulables con soda en presencia de fenolftaleína. Una vez titulados estos iones quedan en forma de $Al(OH_2)_5^{2+}$ y se valorará el Al^{+3} presente en forma hidratada de acuerdo a las ecuaciones 27 y 28:

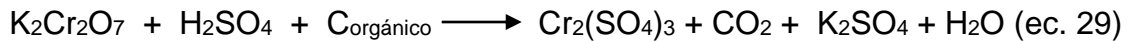


El NaOH producido se titula con HCl y como la cantidad de NaOH depende de la cantidad de $AlCl_3$, el número de miliequivalentes de ácido clorhídrico empleados para neutralizar el NaOH es igual al número de miliequivalentes de Al^{+3} .

La acidez intercambiable menos acidez de aluminio es igual a la acidez del H^+ .

★ **Materia orgánica**

Se realiza mediante el método de Walckley – Black, el cual consiste en oxidar el carbono orgánico presente en el suelo con un oxidante en medio ácido, utilizando como oxidante $K_2Cr_2O_7$ 1N y como medio ácido sulfúrico concentrado, como se muestra en la ecuación 29.

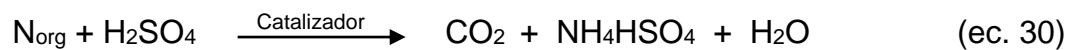


★ **Determinación de nitrógeno por el método de Kjeldahl**

Este método es el utilizado universalmente para la determinación cuantitativa de N procedente de diversos materiales, comprende tres etapas:

1) Oxidación de la muestra

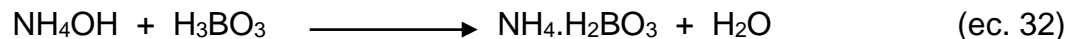
Las muestras de suelo se tratan separadamente con H_2SO_4 y catalizadores para oxidar la materia orgánica y convertir el nitrógeno en sulfato ácido de amonio según la ecuación 30:



El equipo utilizado en la digestión es el BÜCHI B-426

2) Descomposición del sulfato ácido de amonio

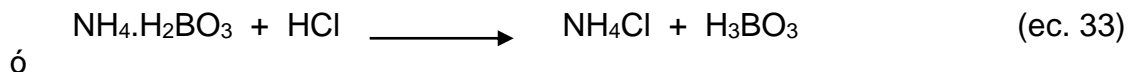
El sulfato de amonio se descompone por medio de un exceso de álcali para liberar el amoniaco el cual se recoge por destilación sobre ácido bórico, (ecuaciones 31-32).



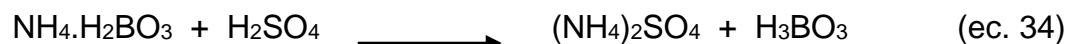
El equipo de destilación empleado es BÜCHI K-314

3) Titulación del borato de amonio

El borato de amonio formado en el paso anterior se valora con HCl o H_2SO_4 utilizando como indicadores una mezcla de rojo de metilo y azul de metileno o de rojo de metilo y verde de bromocresol, (ecuaciones 33 - 34):



ó



El equipo empleado para esta titulación es el titulador universal METROHM E-70

★ **Determinación de fósforo disponible**

El método utilizado para esta determinación es el Bray II, para suelos ácidos, en el cual el ión fluoruro precipita el calcio soluble extrayendo así las formas de P-Ca más solubles. Una vez extraído el fósforo se procede a su determinación por el método colorimétrico, formando un complejo del fósforo con ácido molíbdico que absorbe a 660nm. El método cloro-molíbdico utiliza una solución de HCl-(NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O que al reaccionar produce H₂MoO₄. Posteriormente este ácido molíbdico reacciona con el ácido fosfórico de acuerdo a la ecuación 35.



Este hetero compuesto incoloro forma un compuesto de color azul por reducción con ácido ascórbico, que absorbe a 660 nm. El equipo utilizado en esta determinación es el Espectrofotómetro visible SPECTRONIC GENESYS 20.

★ **Determinación de Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C)**

Consiste en desplazar todos los cationes del suelo y reemplazarlos por iones NH₄⁺, el suelo seco, tamizado y muy fino, se satura con NH₄⁺. Posteriormente, se desplaza los iones NH₄⁺ adsorbidos con NaCl, al 10%) obteniéndose NH₄Cl en solución que se trata con formaldehído neutro. El HCl obtenido se titula con NaOH 0,1 N. La ecuación 36 muestra lo que ocurre.



★ **Determinación de las bases Intercambiables**

Corresponden al Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio, se determinaron en el primer extracto del tratamiento con Acetato de amonio (AcONH₄) de la determinación de C.I.C y la cuantificación se realizó por espectrofotometría de Absorción Atómica, en el equipo solar UNICAM 989 del laboratorio de la CRC

4.4. EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE P MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Con el propósito de evaluar la adsorción de P en los dos suelos y medir su máxima capacidad de adsorción, se valoran las Isotermas mediante la ecuación de Langmuir, empleando el método propuesto por Fox y Kamprath ⁽²⁰⁾. Para tal fin, se sigue el procedimiento detallado a continuación:

4.4.1. Determinación de las características químicas del fertilizante Triple 15: El porcentaje de P se determina mediante la digestión del fertilizante con una relación 3:1 de los ácidos perclórico -nitrógeno y se cuantifica mediante el método colorimétrico como P_2O_5 .

La solubilidad del fertilizante se determina mediante el método masa volumen, agregando a 100 mL de agua 10 g de Triple 15, determinando la solubilidad por la diferencia entre la masa inicial del Triple 15 y el remanente obtenido por filtración.

4.4.2. Tamizaje: Cada una de las muestras de suelos secas al aire, se tamizan por malla No.10.

4.4.3. Preparación de suspensiones: Se toman 5 g de suelo, se suspende en 50 mL de una solución de NaCl 0.03 M, con cantidades crecientes de P, seleccionadas con base en el nivel de P disponible, y en el nivel óptimo de 30 ppm para un suelo fértil. Se utilizan dos fuentes: Una sal pura, KH_2PO_4 y uno de los fertilizantes más utilizado en el Cauca, Triple 15, en soluciones cuyas concentraciones comprenden entre 0, 1250, 2500, 3750, 6250, 10000, 12500 18750 y 0, 1353, 2724, 3607, 5040, 6440 y 7753 mg P/Kg suelo respectivamente. Se adiciona a cada una de ellas siete gotas de cloroformo para evitar que la actividad microbiana afecte los resultados.

4.4.4. Incubación de las suspensiones: Las suspensiones se agitan mecánicamente inicialmente en forma continua durante seis horas para el suelo 1 y tres horas para el suelo 2. Se incuban a una temperatura de 25 °C agitando intermitentemente durante treinta minutos cada doce horas hasta alcanzar el punto de equilibrio. Los tratamientos se realizan por triplicado.

4.4.5. Valoración del P retenido: Para valorar el P retenido, se tiene en cuenta la diferencia entre el contenido del fósforo que permanece en la solución una vez alcanzado el equilibrio y el contenido de fósforo suministrado mediante el método colorimétrico, formando un complejo de fósforo con el ácido molibídico que absorbe a 660 nm como se describió en 4.3.2. Los tratamientos se hacen por duplicado.

4.4.6. Elaboración de Cinéticas de retención: Con el objeto de determinar el tiempo en el que se alcanza el equilibrio de retención, se realiza inicialmente la cinética, empleando el método en paralelo. Cada 24 horas se determina el P retenido durante siete días.

4.5. FRACCIONAMIENTO DEL FÓSFORO

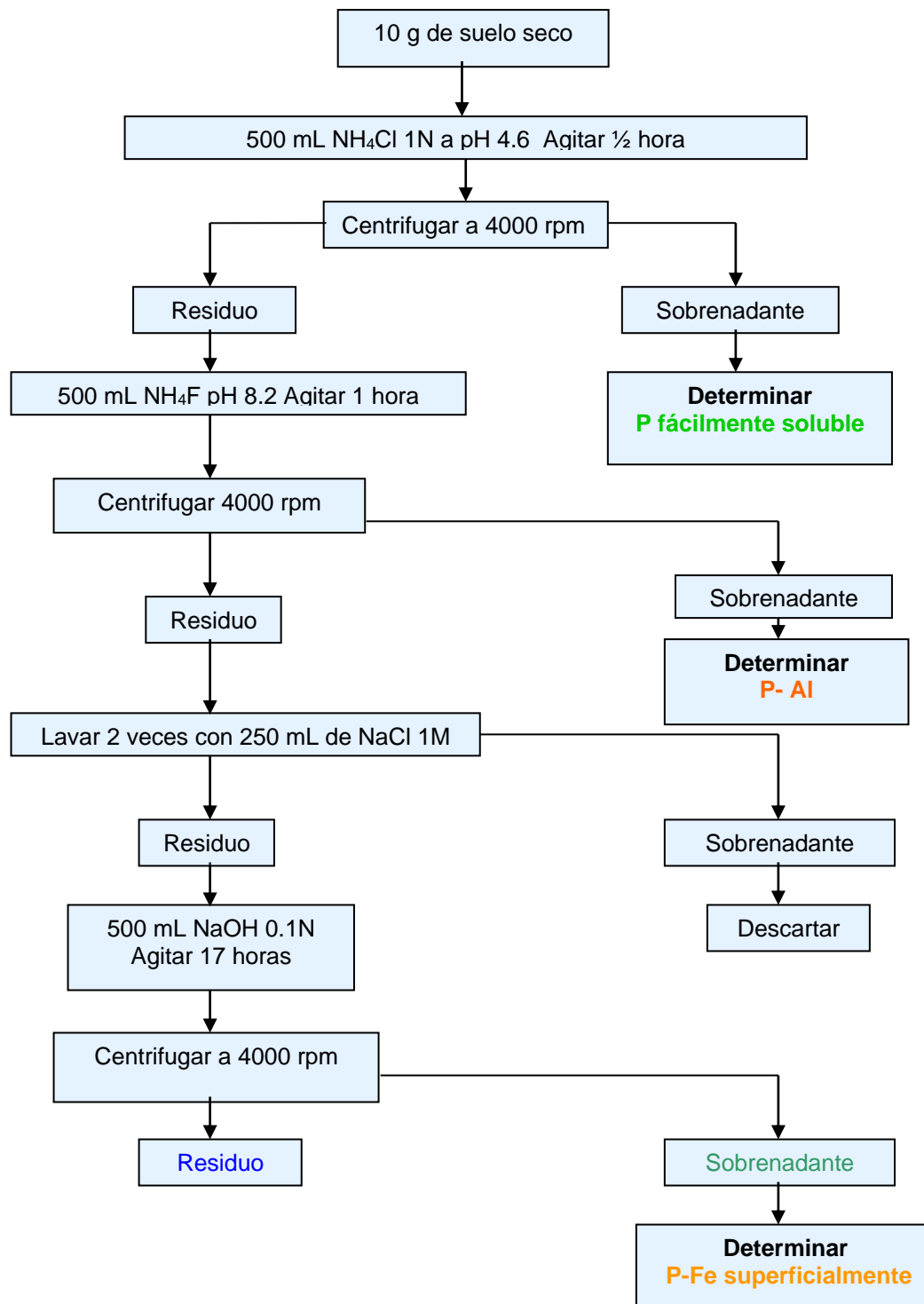
Se aplica el método descrito por Chang y Jackson reportado por López ⁽²³⁾, e implementado en el laboratorio de Agroquímica por Marquínez y Potosí ⁽⁴⁾, para separar el fósforo en grupos de diferente disponibilidad e involucra una extracción secuencial del fósforo con diferentes soluciones. La forma secuencial de extracción se reporta en la tabla 4, la secuencia de extracción va desde el número 1 hasta el número 6. El fósforo orgánico y el fósforo total no hacen parte de la extracción secuencial. La denominación de las fracciones se reporta en la tabla 2 y el procedimiento efectuado para el fraccionamiento se relaciona en las figuras de la 11 a la 14.

Tabla 2. Denominación de las Fracciones de Fósforo.

Secuencia de extracción No.	Extractante	Fracción determinada
1	NH ₄ Cl 1N pH 4.6	P fácilmente soluble
2	NH ₄ F 0.5N pH 8.2	P unido al Al (P-Al)
3	NaOH 0.1N	P unido al Fe superficial (P-Fe)
4	Citrato-ditionito Bicarbonato	P unido al Fe y Al ocluido (P-Al P-Fe ocluido)
5	NaOH 1N	P unido al Fe y Al más ocluido (P-Al, P-Fe más Ocluido)
6	H ₂ SO ₄ 0.5 N	P unido al calcio (P-Ca)
*	H ₂ SO ₄ 0.6 N	P orgánico
*	Ácido Nítrico-Ácido perclórico (1:3)	P total

* No hacen parte de la extracción secuencial

Figura 11. Diagrama para el fraccionamiento de fósforo



Continuación figura 11

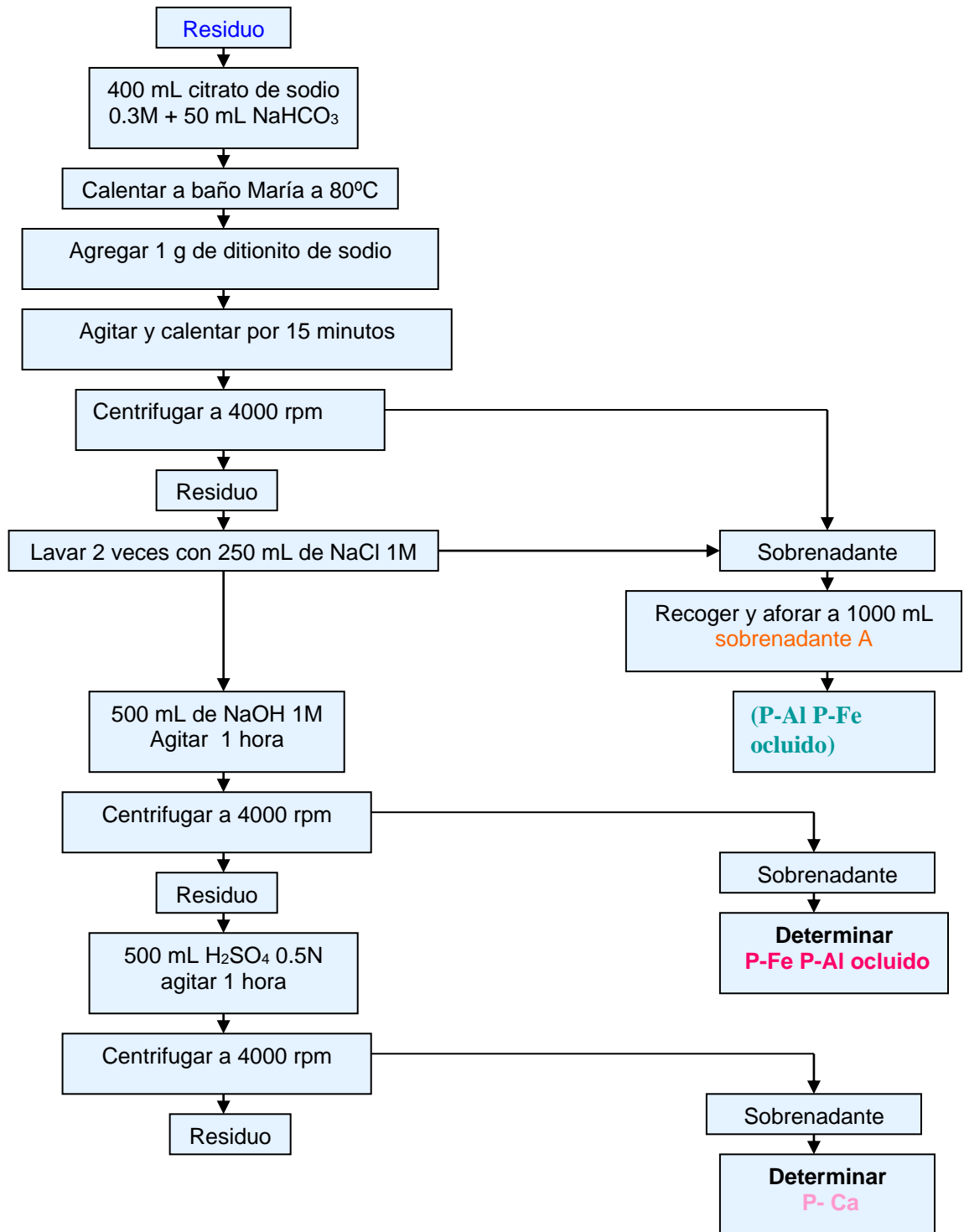


Figura 12. Diagrama para la determinación de fósforo soluble en reductante

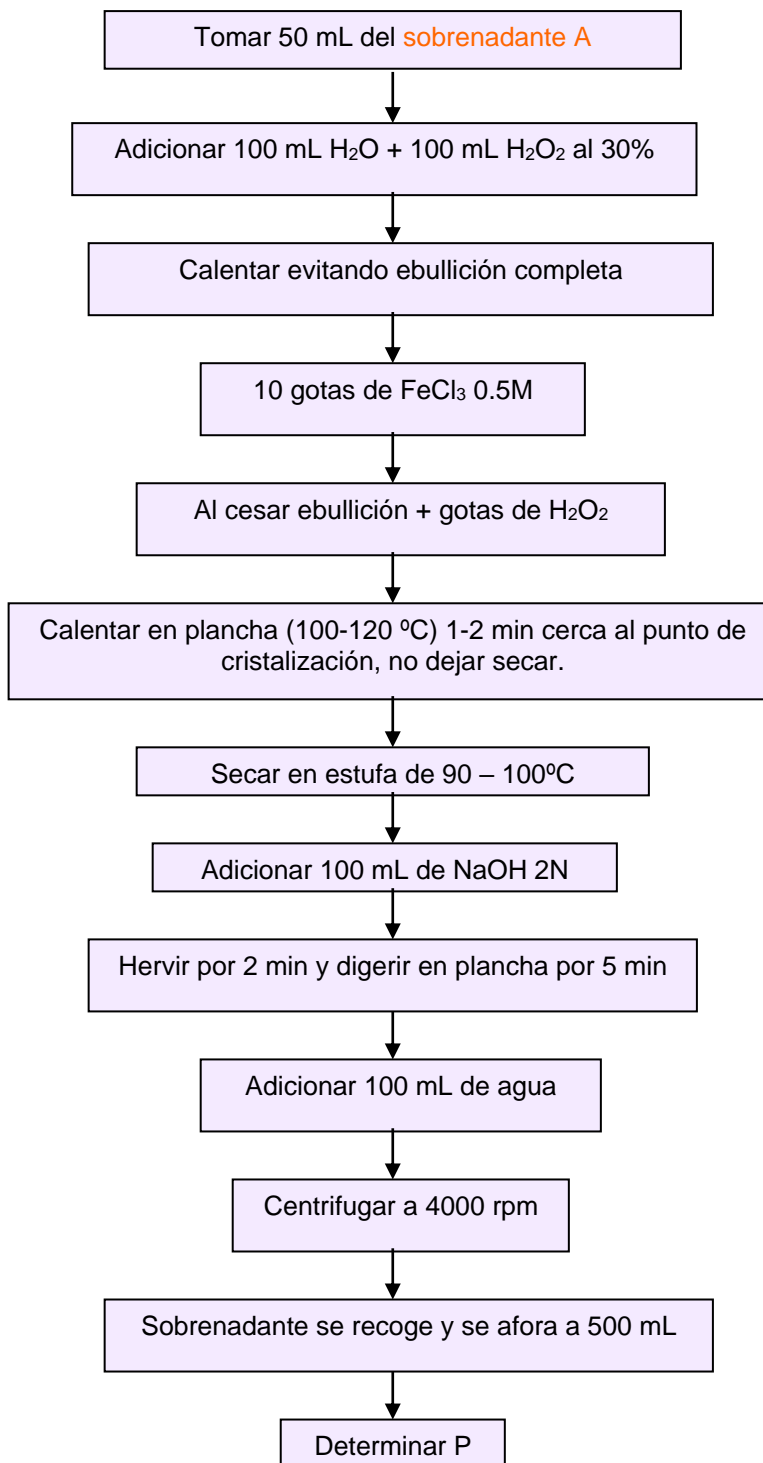
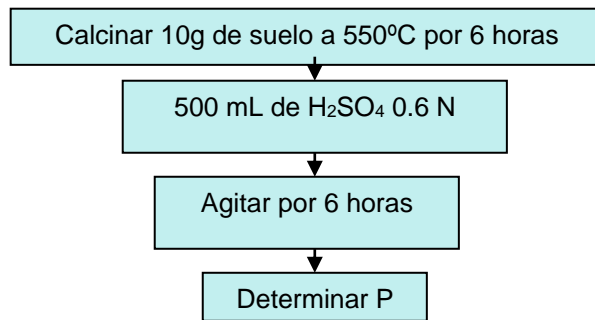
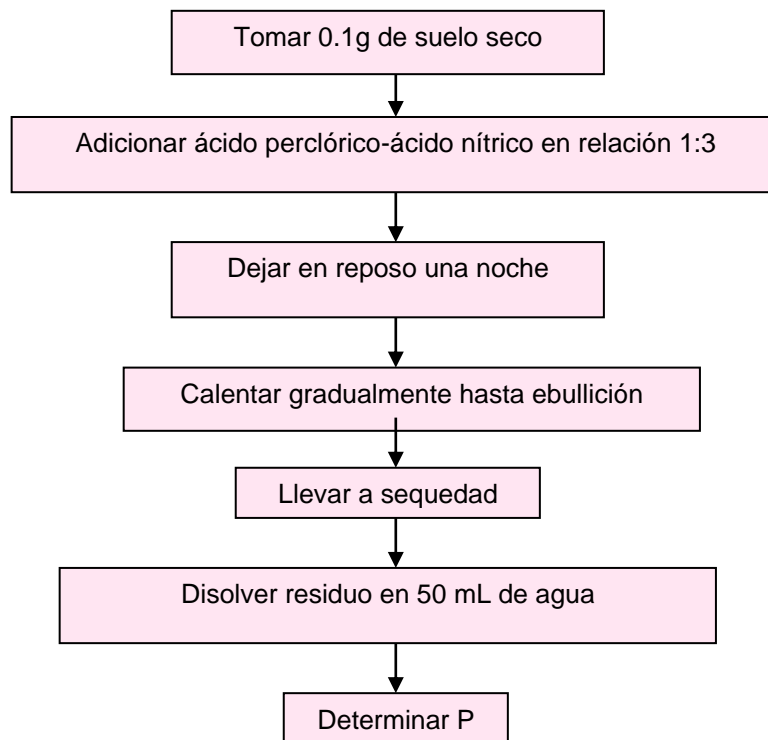


Figura 13. Diagrama de determinación de fósforo orgánico



Nota: igual procedimiento se aplica a una muestra sin calcinar, por diferencia entre las dos extracciones se determina el P orgánico.

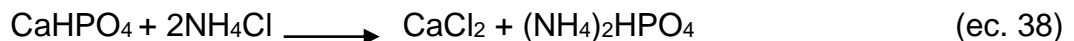
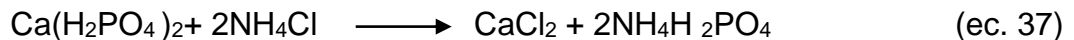
Figura 14. Diagrama de determinación de fósforo total



Nota: igual procedimiento se aplica a una muestra sin calcinar, por diferencia entre las dos extracciones se determina el P orgánico.

El orden de estas secuencias se explica a continuación:

- El primer extractante utilizado fue el NH_4Cl a pH 4.6, que se emplea para extraer el fósforo fácilmente soluble, es decir el que se encuentra en solución como fosfatos de calcio. Teniendo en cuenta el valor del pH del suelo y el diagrama de solubilidad de los iones fosfato (figura 57) el fosfato de calcio se encontraría en las dos formas: como $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y como CaHPO_4 , predominando la primera forma. Con base en estas consideraciones se plantean dos posibles ecuaciones 37 y 38 así:



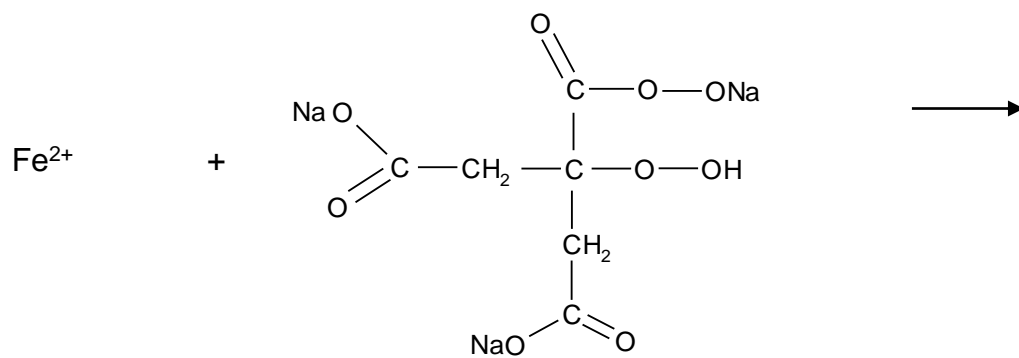
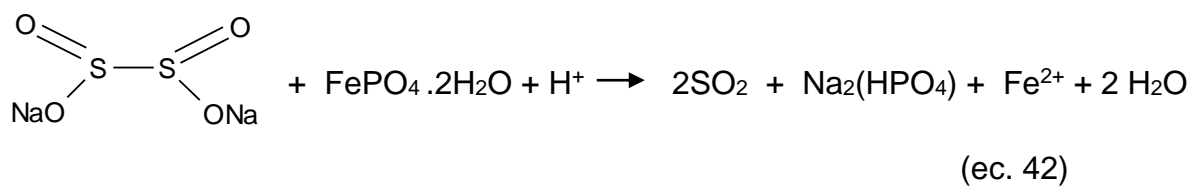
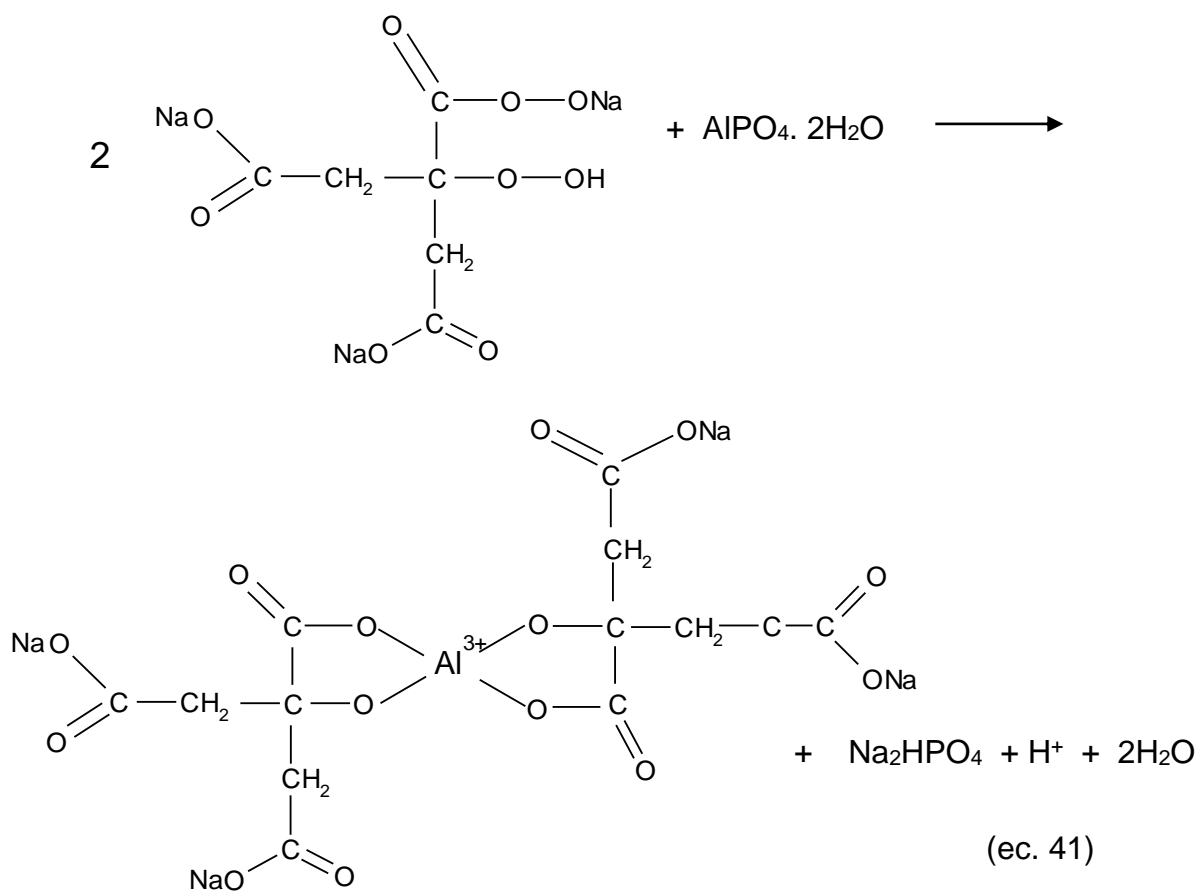
- En el segundo paso de la secuencia se determina el fósforo unido al aluminio empleando una solución de fluoruro de amonio pH 8.2, es necesario que la solución tenga este pH para minimizar la disolución de fosfatos de hierro y aluminio, permitiendo así que los fosfatos de aluminio queden en solución. Se propone la ecuación 39 que es la siguiente:

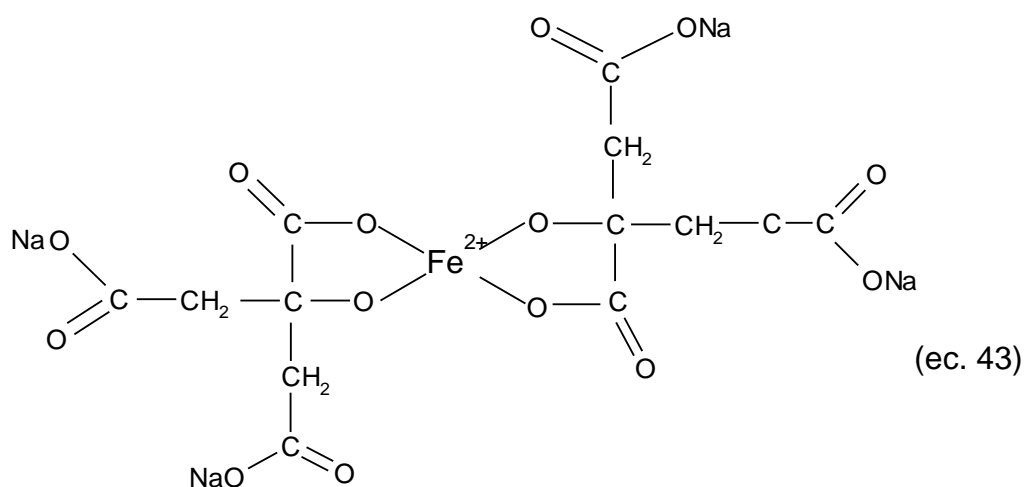


- En el tercer paso de la secuencia se utiliza NaOH 0.1N para extraer el fósforo unido al hierro superficial, como se propone en la ecuación 40.

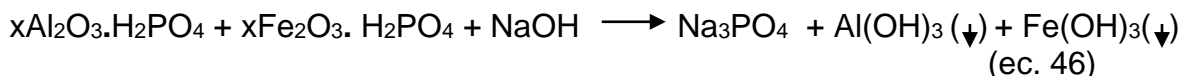
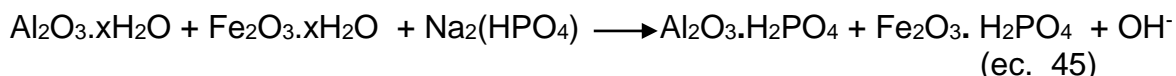
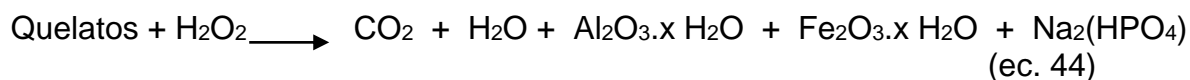


- El cuarto paso de la secuencia comprende la extracción de P unido al Fe y Al ocluido con una solución reductante de citrato, ditionito y bicarbonato. Para ello es necesario primero adicionarle a la muestra citrato, el cual quelata el hierro y el aluminio. Para facilitar la quelatación del Fe^{3+} que es muy estable, es necesario reducirlo a Fe^{2+} empleando el ditionito, un fuerte agente reductor. Quelatando estos metales se solubilizan y se libera el P adsorbido sobre ellos, solubilizándolo para su posterior determinación, una vez se elimine la interferencia causada por los citratos los cuales absorben a 660 nm. Las posibles ecuaciones son 41, 42 y 43.



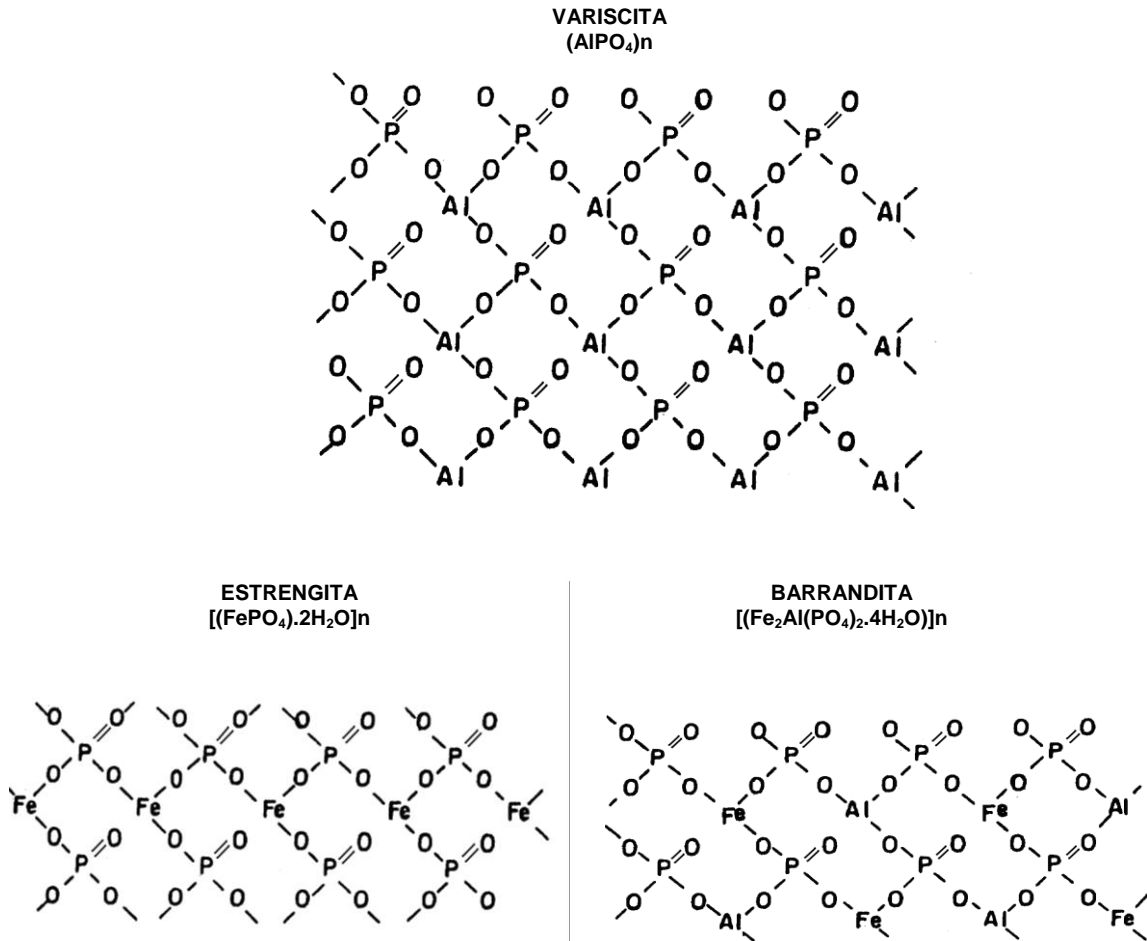


Para eliminar esa interferencia se realiza un tratamiento a la solución anterior; con peróxido de hidrogeno, el cual oxida los citratos formando óxidos de hierro y aluminio, que nuevamente reaccionarían con el P precipitándolo. Por ello, posteriormente son solubilizados con NaOH 2N con el propósito de precipitar el Fe y el Al en forma de hidróxidos y obtener el P en forma soluble para su determinación, ecuaciones 44 – 46.

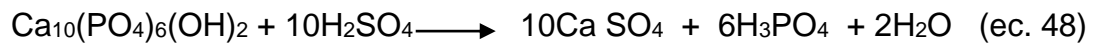
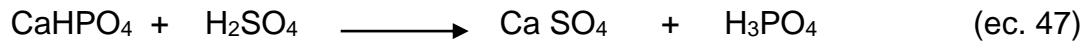


- El quinto paso en la secuencia extrae el fósforo unido al hierro y aluminio más ocluido con NaOH 1N, que a diferencia de la extracción con NaOH 0.1N extrae los fosfatos unidos al Fe y al Al que quedan accesible después de disolver los sexquioxidos durante el tratamiento con citrato-ditionito y bicarbonato ⁽²³⁾, en la figura 15 se muestra algunas estructuras de los fosfatos ocluidos.

Figura 15. Estructura de algunos fosfatos ocluidos



- El sexto y último paso en la secuencia corresponde al fósforo unido al calcio presente posiblemente en dos formas, cuyo extractante es H₂SO₄ 0.5N; ya que a pH básico estos fosfatos precipitan. Para esta extracción se plantean las ecuaciones 47 y 48:



La determinación del fósforo orgánico se realiza por diferencia entre una muestra de suelo calcinada y otra sin calcinar. La calcinación permite que se destruya toda la materia orgánica, quedando solo el fósforo inorgánico lo cual no se garantiza,

debido a que parte del fósforo inorgánico se puede solubilizar por las altas temperaturas ⁽²⁹⁾.

A las dos muestras se les adiciona ácido sulfúrico para poder extraer de la solución mineral el fósforo.

El fósforo total se determina realizando una digestión con ácido perclórico y ácido nítrico relación 3:1, con el fin de destruir la materia orgánica y digerir la fracción inorgánica; al final se obtuvo un residuo blanco con partículas negras.

4.6. CORRELACIÓN ENTRE LA ADSORCIÓN DE P, LAS FRACCIONES DE FÓSFORO Y OTRAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS.

Una vez realizadas las diferentes isothermas y las diferentes fracciones de P en los suelos se procede el análisis estadístico que comprende en primer lugar, detectar si los datos se ajustan a la distribución normal o no. Seguidamente se realizaron pruebas paramétricas como Pearson, análisis mediante prueba de comparación múltiple de Duncan, y no paramétricas como Sperman entre otras. Se determinan para ello: Valores de media, desviación típica, error estándar. Análisis de significancia estadística ($p > 0,05$), p basado en análisis de covarianza ajustada. Interacciones de variables dependientes en función de las variables independientes. Análisis de asociación y de correlación. Efecto combinado de diferentes factores. Análisis de regresión etc. Todo lo anterior se realizó mediante un software o un paquete estadístico SPSS.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE LOS SUELOS

En las tablas 3 y 4 se recopilan los resultados para los análisis físicos y químicos realizados a las muestras de suelo empleadas en esta investigación. Los resultados para su interpretación se comparan con los datos reportados por SCCS (2000) ⁽³⁰⁾, descritos en las tablas 1 – 6 del anexo 1.

La zona rural del municipio de Cajibío (Departamento del Cauca), se caracteriza por presentar suelos con una alta humedad. El suelo 1, proveniente de este municipio, es de color oscuro, presenta un porcentaje de humedad de 20.01%, que corresponde a una alta humedad. Su textura es franco arenosa. Con bajo contenido de arcillas (7.74 %), indicando que la retención de humedad se puede atribuir al alto contenido de materia orgánica (9.44 %), detectado en éste suelo.

El valor de la densidad real del suelo 1 es de 0.68 g/mL indicando un suelo de rango bajo a normal influenciada por el alto contenido de materia orgánica. La materia orgánica tiende a reducir la densidad suelo/masa debido a su baja densidad y a la estabilización de la estructura del suelo que resulta en mayor porosidad.

El pH 5.09 determinado, clasifica este suelo como fuertemente ácido. Esto influye en la disponibilidad de muchos nutrientes para la planta, a este pH se favorece la adsorción de nutrientes como el fósforo, el boro, el azufre y molibdeno en la fase coloidal, ya que pueden intercambiarse anionicamente, puesto que se forman cargas positivas en los coloides, favoreciendo la capacidad de intercambio aniónico. A este pH se afecta también la actividad metabólica de los microorganismos, influyendo así en los procesos de transformación de la MO.

La CIC, medida de la cantidad de las cargas negativas presentes en las superficies minerales y orgánicas del suelo, es alta y representa la cantidad de cationes que pueden ser retenidos en esas superficies, lo que se puede atribuir mayoritariamente a la MO. El valor de CIC efectiva 5.36 meq/100 g suelo indica que no se produce un lavado influyente de nutrientes como Ca, Mg o K en dicho suelo, ya que este valor está por encima de 4 y por lo tanto la débil deficiencia de Ca y Mg observada en este suelo se puede atribuir a la continua extracción por parte de los cultivos sin que se presente reposición de ellos. El nivel de K es alto 0.47 meq /100 g suelo, proveniente principalmente de las arcillas presentes en este suelo. La relación Ca/Mg es normal.

La acidez intercambiable es baja. El Al intercambiable así como su saturación son bajos de tal manera que no presenta toxicidad ni para el suelo ni para las plantas. Debido que el porcentaje de saturación de Al es menor que las bases de

cambio (ver tabla 3), no afecta la retención de estas últimas. Por lo tanto la acidez se atribuye principalmente a la MO la cual puede disociar y liberar iones H^+ .

El porcentaje de nitrógeno total presente en el suelo es de 0.79 %. Aunque éste porcentaje de nitrógeno es alto, proveniente del alto nivel de MO, no se puede asegurar su alta disponibilidad para la absorción por las plantas, debido a que ese valor incluye tanto el nitrógeno en forma orgánica como inorgánica. La forma orgánica que representa casi la totalidad del nitrógeno en el suelo no puede ser utilizada por la planta mientras no se transforme previamente en nitrógeno inorgánico, mediante una serie de procesos fundamentalmente de tipo bioquímico en los cuales influyen factores tales como la temperatura, el pH y la humedad.

La relación C/N indica una alta mineralización de la materia orgánica, en este suelo, poca fuente de energía para los microorganismos y posiblemente de esta manera influye negativamente en el proceso de humificación de la MO ocasionando así fuerte acidez al suelo con consecuencias negativas de fertilidad.

El suelo presenta un bajo contenido de fósforo disponible 2.40 ppm , atribuible a la fuerte acidez, siendo posible que esté intercambiado anionicamente o precipitado en forma de fosfatos de Al y de Fe. Aunque el nivel de materia orgánica es alto, produce fuerte acidez favoreciendo así la retención de P en el suelo. Esta retención también se puede atribuir probablemente a la presencia de alófanos en este suelo, según nos muestra sus propiedades físicas y químicas tales como: el pH, el porcentaje de saturación de agua y la densidad, formando el complejo humus-aluminio- P.

El suelo 2 proveniente de la Finca La Lorena, vereda Senda Magín municipio de El Tambo Cauca, presenta un color terracota. La textura que este suelo presenta es franco arcillosa, con un 35.7 % de arcillas. La humedad es alta, la densidad real 1.38 g/mL se considera baja, aún cuando el nivel de MO es bajo, y la acidez es muy fuerte, lo que indica que todas estas propiedades se pueden atribuir probablemente a la presencia de alófanos (aluminosilicatos no cristalinos constituidos principalmente por $Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2$ originado de arcillas de suelos derivados de cenizas volcánicas) que le proporcionan una alta capacidad de retención de humedad, una fuerte acidez y capacidad de retención de fosfatos, boratos y otros aniones.

El pH 4.67 confiere al suelo una acidez muy fuerte por lo cual se ve limitada la disponibilidad de muchos nutrientes para la planta. Esta acidez se atribuye principalmente al muy alto contenido de Aluminio 6 meq/100 g suelo cuya saturación es también muy alta, presentando toxicidad para las plantas porque este elemento inhibe el proceso de división celular de las raíces, impidiendo su crecimiento y normal desarrollo. Además afecta la bioestructura del suelo produciendo erosión continuada y progresiva como se detecta en este suelo.

Tabla 3. Análisis Físico y Químico del Suelo 1

PROPIEDADES FÍSICAS											
SUELO	(%) HUMEDAD	% SATURACIÓN DE AGUA	DENSIDAD REAL (g/mL)	GRANULOMETRÍA			TEXTURA				
				% Arenas	% Arcillas	% Limos					
ANDISOL	20.01	78.55	0.681	68.17	7.74	24.09	FRANCO ARENOSA				
PROPIEDADES QUÍMICAS											
pH	% C _{org}	% M.O	% N	P (ppm)	C/N	Acidez Intercambiable meq/100g suelo	Al ³⁺ intercambiable meq/100g suelo	H ⁺ intercambiable meq/100g suelo	Capacidad de Intercambio meq/100g suelo		
5.09	5.71	9.44	0.79	2.40	7.23	0.55	0.44	0.11	56.80		
BASES DE CAMBIO											
Calcio meq/100g	Magnesio meq/100g	Sodio meq/100g	Potasio meq/100g	Ca/Mg	Capacidad de intercambio Efectiva meq/100g suelo	% SATURACIÓN DE BASES					
						% Saturación Bases	% Ca	% Mg	% Na	% K	% Al
2.82	1.20	0.32	0.47	2.35	5.36	89.73	52.61	22.39	5.97	8.77	8.21

La CIC indica un suelo con bajo contenido de MO y se atribuye al alto contenido de arcillas. Se aprecia una fuerte deficiencia de Ca, Mg con una baja relación Ca/Mg, indicando que predomina la deficiencia de Ca. Las saturaciones de estas bases son bajas, indicando que predominan en los sitios de intercambio los iones Al^{3+} , lo cual facilita la lixiviación de dichas bases causando la deficiencia de estos nutrientes en la planta. El nivel de K es medio, proveniente del alto contenido de arcillas.

El porcentaje de nitrógeno total es bajo, indicando una deficiencia de este nutriente para las plantas. La relación C/N es baja, implicando una muy fuerte mineralización y pérdida de MO ocasionando pérdida de bioestructura y erosión continuada y progresiva.

Se observa una fuerte deficiencia de fósforo, atribuible a la muy fuerte acidez o a la retención aniónica por parte de los alófanos presentes en este suelo y también a la formación de fosfatos de aluminio y/o de hierro.

Al comparar el suelo 1 con el 2, se observa que la diferencia radica principalmente en el contenido de MO, en la textura, en la saturación de Aluminio, en el origen de la acidez, en la densidad real, en el porcentaje de saturación de bases y en la relación Ca/Mg. En el suelo 1 el contenido de MO es alto y esta le confiere la alta acidez al suelo, mientras que en el suelo 2 el contenido de MO es bajo y la acidez de este suelo proviene posiblemente del alto nivel de Al intercambiable producido probablemente por los alófanos (cuya presencia se deduce por las características encontradas en él) y no de la MO, donde esta última influye también en el valor de la densidad real. La saturación de Al en el suelo es baja, mientras que en el suelo 2 es muy alta, ya que en éste último es superior la saturación de dicho elemento que las bases de cambio. Por otra parte, en el suelo 1 la relación Ca/Mg es normal, mientras que en el suelo 2 dicha relación indica que predomina la deficiencia de Ca.

En ambos suelos con características diferentes se encuentra una fuerte deficiencia de Fósforo.

5.2. EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE P MEDIANTE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Con el propósito de evaluar la adsorción de P en los dos suelos y medir su máxima capacidad de adsorción, se valoran las Isotermas mediante la ecuación 23 de Langmuir.

Tabla 4. Análisis Físico y Químico del Suelo 2

PROPIEDADES FÍSICAS											
SUELO	(%) HUMEDAD	% SATURACIÓN DE AGUA	DENSIDAD REAL (g/mL)	GRANULOMETRÍA			TEXTURA				
				% Arenas	% Arcillas	% Limos					
ANDISOL	18.87	54.55	1.38	33.83	35.70	30.47	FRANCO ARCILLOSA				
PROPIEDADES QUÍMICAS											
pH	% C _{org}	% M.O	% N	P (ppm)	C/N	Acidez Intercambiable meq/100g suelo	Al ³⁺ intercambiable meq/100g suelo	H ⁺ intercambiable meq/100g suelo	Capacidad de Intercambio meq/100g suelo		
4.67	1.31	2.26	0.14	2.06	9.36	6.52	6.0	0.52	32.82		
BASES DE CAMBIO											
Calcio meq/100g	Magnesio meq/100g	Sodio meq/100g	Potasio meq/100g	Ca/Mg	Capacidad de intercambio Efectiva meq/100g suelo	% SATURACIÓN DE BASES					
						% Saturación Bases	% Ca	% Mg	% Na	% K	% Al
1.00	0.94	0.14	0.22	1.06	8.82	26.08	11.34	10.66	1.59	2.4 9	68.03

5.2.1. Cinética de retención de fósforo en los suelos

Para obtener las isotermas, inicialmente es necesario elaborar las cinéticas de adsorción con el propósito de establecer el tiempo de equilibrio en donde ya no se presente más retención, incubando los suelos con soluciones de determinada concentración de P.

5.2.1.1. Cinética de retención de P en los dos suelos a partir de KH_2PO_4 y de Triple 15 con dosis bajas: Con base en el nivel de P encontrado en los suelos, 2.4 para el suelo 1 y 2.06 mg P/Kgsuelo para el suelo 2 se suministra P de tal manera que se alcance el nivel óptimo de 30 mg P/Kg suelo. Las soluciones suministradas se determinaron teniendo en cuenta la eficiencia o la aprovechabilidad del P cuando llega al suelo, para tal fin presentan concentraciones de: 62.5, 125 y 250 mg P/Kg de suelo. Los resultados de estas cinéticas se relacionan en las tablas de 5 a 8 y las figuras 16 a 19.

Tabla 5. Cinética de retención de P en el suelo 1, fortificado con KH_2PO_4 durante 7 días

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	P Adsorbido (mg P/Kgsuelo)						
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
125	125	125	125	125	125	125	125
250	250	250	250	250	250	250	250

Figura 16. Cinética de retención de P en el suelo 1 fortificado con KH_2PO_4

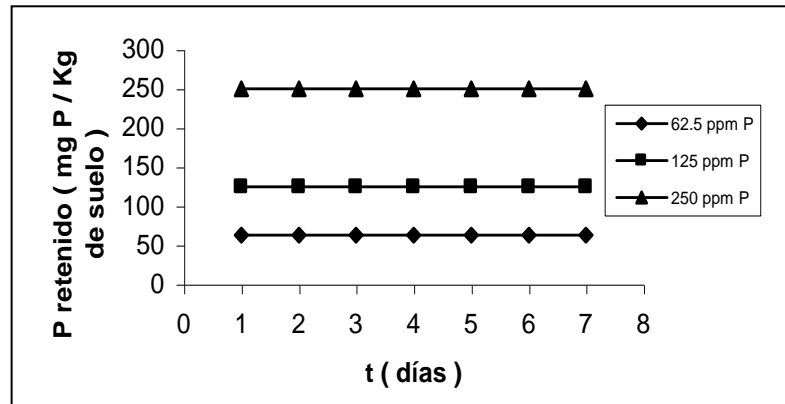


Tabla 6. Cinética de retención de P en el suelo 1, fortificado con Triple 15 durante 7 días

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	P Adsorbido (mg P/Kgsuelo)						
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
125	125	125	125	125	125	125	125
250	250	250	250	250	250	250	250

Figura 17. Cinética de retención de P en el suelo 1, fortificado con Triple 15

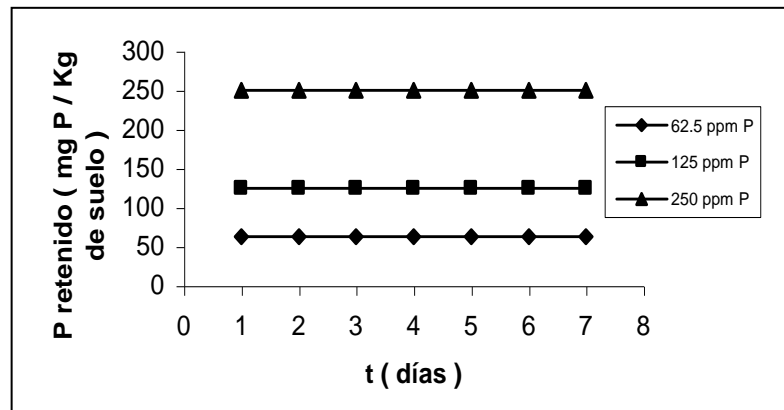


Tabla 7. Cinética de retención de P en el suelo 2, fortificado con KH_2PO_4 durante 7 días

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	P Adsorbido (mg P/Kgsuelo)						
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
125	125	125	125	125	125	125	125
250	250	250	250	250	250	250	250

Figura 18. Cinética de retención de P en el suelo 2, fortificado con KH_2PO_4

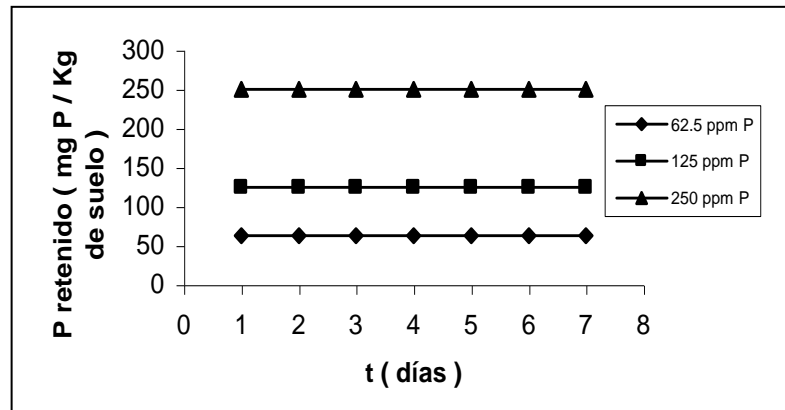
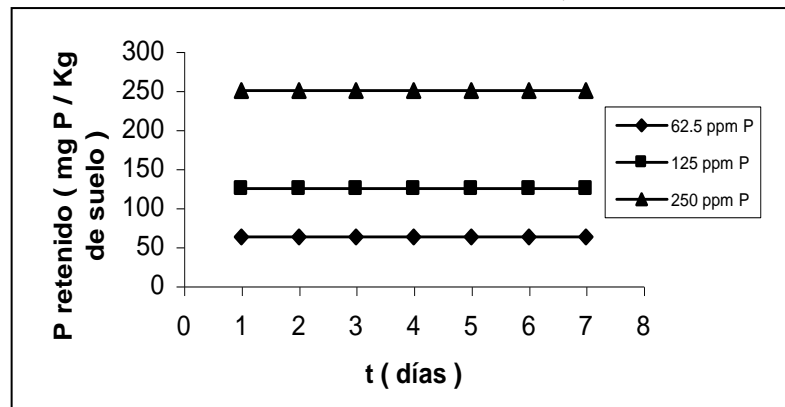


Tabla 8. Cinética de retención de P en el suelo 2, fortificado con triple 15 durante 7 días

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	P Adsorbido (mg P/Kgsuelo)						
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
125	125	125	125	125	125	125	125
250	250	250	250	250	250	250	250

Figura 19. Cinética de retención de P en el suelo 2, fortificado con Triple 15



En las tablas 5 y 6 y las figuras 16 y 17, se observa que desde el primer día todo el P suministrado en forma de KH_2PO_4 es retenido completamente para todas y cada una de las dosis suministradas para ambos suelos y esa retención se mantiene durante los 6 días restantes., presentando así, una cinética constante.

El mismo comportamiento se observa para la cinética elaborada con Triple 15 como se deduce de las tablas 7 y 8 y las figuras 18 y 19, por esta razón, se decide realizar la cinética adicionando dosis más altas de P.

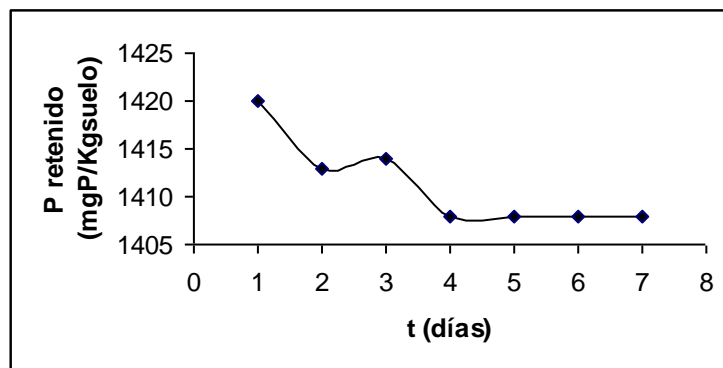
5.2.1.2. Cinética de retención de P en los dos suelos a partir de KH_2PO_4 y de Triple 15 con dosis altas: Para obtener las isotermas, es necesario elaborar las cinéticas de adsorción fortificando los suelos con dosis altas de P, incubando el suelo con soluciones de KH_2PO_4 y el fertilizante Triple 15, con el propósito de establecer el tiempo de equilibrio en donde ya no se presente más retención.

- **Suelo 1 fortificado con KH_2PO_4 .** El suelo 1 es incubado con soluciones de KH_2PO_4 cuyas concentraciones comprenden: 1425, 2850 y 5700 mg P/Kg suelo, los resultados se relacionan en la tabla 9, y figuras 20 - 23 el resultado es el promedio de dos replicas (ver la tabla 1 del anexo 2).

Tabla 9. Cinética de retención de P en el suelo 1 fortificado con KH_2PO_4 durante 7 días

Días	P suministrado (mg P/Kgsuelo)					
	1425		2850		5700	
	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P
1	1420	99.3	2810	98.6	5417	95.0
2	1413	92.1	2824	99.1	5560	97.6
3	1414	99.2	2826	99.1	5596	98.2
4	1408	98.8	2834	99.4	5601	98.3
5	1408	98.8	2820	99.0	5609	98.4
6	1408	98.8	2820	98.9	5603	98.3
7	1408	98.8	2819	98.9	5606	98.4

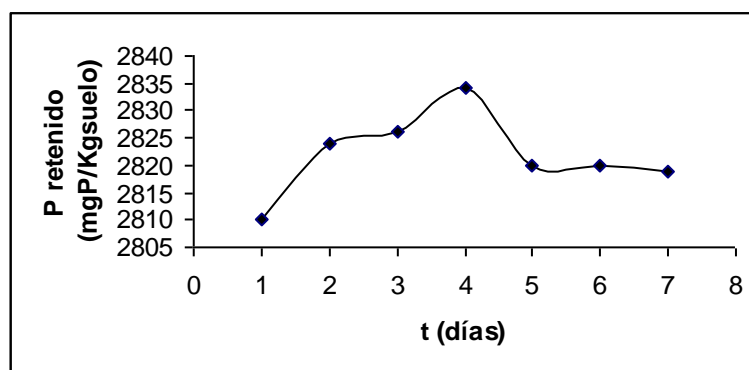
Figura 20. Cinética de retención de P en el suelo 1 fortificado con 1425 mg P/Kg suelo como KH_2PO_4



Las figura 20 se muestra la cinética que se lleva al adicionar 1425 mg P/Kg suelo, donde el 99.3%, del P suministrado es retenido durante el primer día. Posteriormente se observa una liberación de P a la solución durante los días dos, tres y cuatro, en este último se establece el equilibrio entre el P retenido y el P en la solución del suelo. El hecho de que ocurra una liberación de P a la solución del suelo después de una máxima retención, indica probablemente que los grupos fosfato retenidos en los sitios de intercambio aniónico saturan dichos sitios impidiendo así la retención de nuevos grupos por procesos de repulsión a un nuevo grupo de fosfatos, pasando de esta manera a la solución del suelo. Además esta interacción afecta también las fuerzas de adsorción más débiles, de tal manera que se desplaza el equilibrio hacia la solución del suelo. Se podría inferir de ésta gráfica que la máxima capacidad de adsorción de P de este suelo está alrededor de 1408 mg P/Kg suelo.

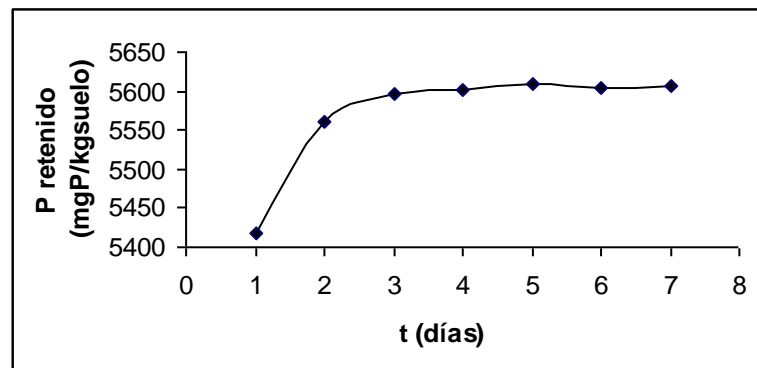
Cuando se duplica la cantidad de P suministrada 2850 mg P/Kg suelo, la cinética se representa en la figura 21 en donde se detecta una adsorción creciente alcanzando en el cuarto día una retención del 99.44% y a partir de éste, ocurre una liberación de P a la solución del suelo obteniéndose el equilibrio de adsorción en el quinto día. La forma de la curva es diferente a la del caso anterior (mitad de la dosis).

Figura 21. Cinética de retención de P en el suelo1 fortificado con 2850 mg P/Kg suelo como KH_2PO_4



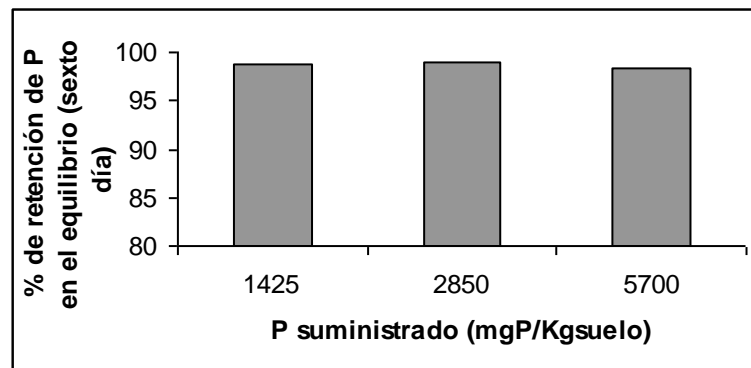
En la figura 22, se representa la cinética al adicionar 5700 mg P/Kg suelo, observándose un comportamiento diferente al de los dos casos anteriores, con una curva asintótica en donde la adsorción se va aumentando paulatinamente hasta alcanzar una máximo en el tercer día, para los siguientes días se presenta un ligero incremento alcanzando así el equilibrio de adsorción con una máxima retención de 98.26% en el quinto día. No se presenta liberación de P a la solución del suelo como en los dos casos anteriores, indicando así una saturación de todos los sitios de adsorción, ya que la alta concentración o dosis suministrada desplaza el equilibrio hacia la fase coloidal del suelo.

Figura 22. Cinética de retención de P en el suelo1 fortificado con 5700 mg P/Kg suelo como KH_2PO_4



En la figura 23 se puede apreciar el porcentaje de adsorción de P en función de la cantidad de P suministrada, a partir de una solución de KH_2PO_4 cuando se alcanza el equilibrio entre el P adsorbido y el P en solución, en ella se destaca que el porcentaje de retención no varía significativamente aún cuando se incremente apreciablemente la dosis suministrada, indicando así la gran capacidad de retención que tiene este suelo y el gran inconveniente que se presentaría agregando fertilizantes de alta solubilidad.

Figura 23. Porcentaje de retención de P en el equilibrio del suelo 1, fortificado con KH_2PO_4 , para cada una de las dosis suministradas



- **Suelo 1 fortificado con fertilizante Triple 15.** En la tabla 10 y figuras 24 - 27 se relacionan los resultados de las cinéticas cuando se incubó el suelo 1 con soluciones de Triple 15 correspondientes a 2280, 4057 y 5592 mg P/Kg suelo, el resultado es el promedio de dos réplicas (tabla 2, anexo 2). Estas dosis son superiores a las suministradas con la sal pura, debido a que este fertilizante comercial no es completamente soluble. Los ensayos

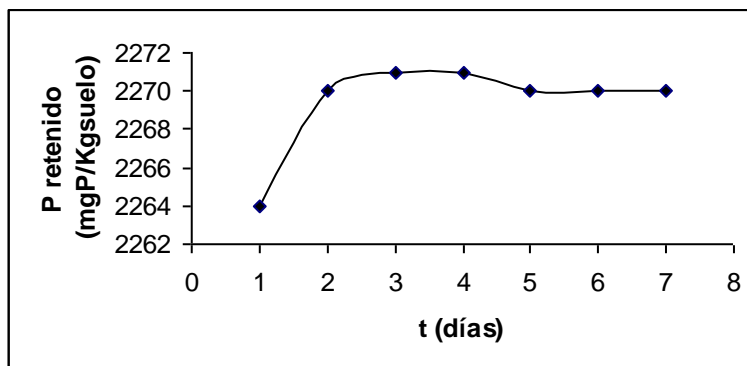
de solubilidad muestran que 0.86 g de triple 15 se solubilizan en 100 mL de agua y el contenido de P_{2O_5} en el fertilizante corresponde al 10.51%, obteniendo una concentración de 395 ppm de P.

Tabla 10. Cinética de retención de P en suelo 1 fortificado con fertilizante Triple 15 durante 7 días

Días	P suministrado (mg P/Kgsuelo)					
	2280		4057		5592	
	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P
1	2264	99.3	3997	98.5	5461	97.6
2	2270	99.5	4021	99.1	5516	98.6
3	2271	99.6	4027	99.3	5526	98.8
4	2271	99.6	4027	99.3	5530	98.9
5	2270	99.6	4035	99.5	5551	99.3
6	2270	99.6	4035	99.5	5550	99.3
7	2270	99.6	4035	99.5	5550	99.3

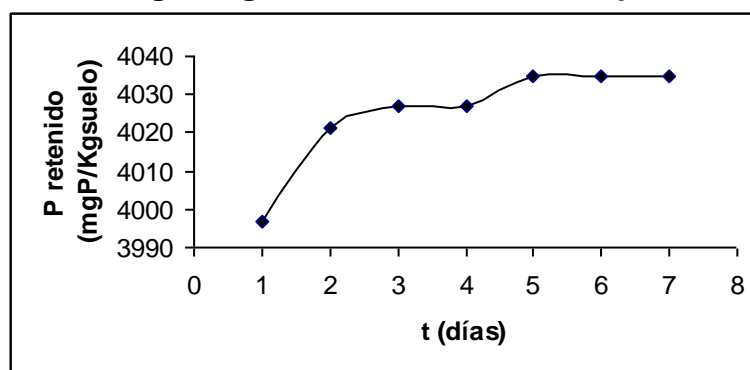
La figura 24 muestra la cinética de retención de P cuando se adiciona 2280 mg P/Kgsuelo en forma de Triple 15, se detecta una curva asintótica en donde hay un gran incremento de la retención entre el primer y segundo día, a partir del cual hay un leve incremento hasta alcanzar su máximo de retención 99.58 % y posteriormente se presenta una liberación de P a la solución del suelo en el quinto día donde se alcanza el equilibrio de adsorción. La retención comprendida entre 99.3 y 99.6% indicando un alto porcentaje de retención durante los siete días del ensayo. La alta concentración de la solución suministrada logra saturar los sitios de adsorción por desplazamiento del equilibrio hacia la fase coloidal del suelo, además por ser un fertilizante compuesto, es probable que exista competencia con los otros aniones presentes en el fertilizante por los sitios de intercambio.

Figura 24. Cinética de retención de P en el suelo 1 fortificado con 2280 mg P /Kg suelo del fertilizante Triple 15



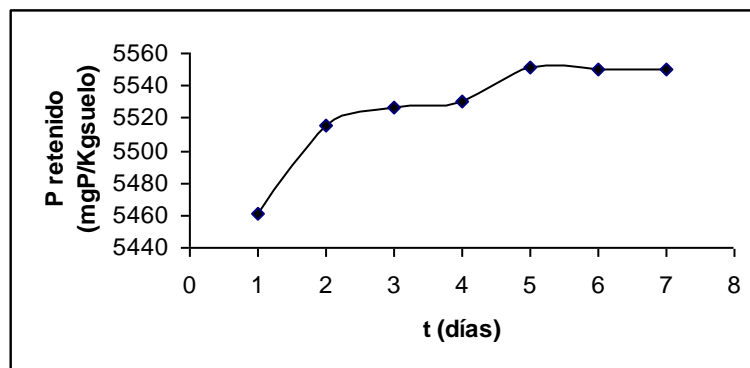
Para la dosis de 4057 mg P/Kg suelo (figura 25), se percibe igualmente una curva asintótica en donde se presenta un fuerte incremento de la adsorción entre el primero y segundo día, luego continúa incrementando la adsorción en forma moderada hasta alcanzar una máxima durante el quinto día a partir del cual se estabiliza alcanzándose así el equilibrio de adsorción con una máxima retención del 99.5% de la dosis suministrada. La retención está comprendida entre 98.5 y 99.5% para los siete días del ensayo, indicando una máxima retención ya que como la dosis suministrada es más alta que en el caso anterior, permite desplazar el equilibrio hacia la fase coloidal del suelo, saturando sitios difíciles de alcanzar, tales como los de la MO, en donde la capacidad de intercambio catiónico es probablemente muy superior a la de intercambio aniónico.

Figura 25. Cinética de retención de P en el suelo 1 fortificado con 4057 mg P /Kgsuelo del fertilizante Triple 15



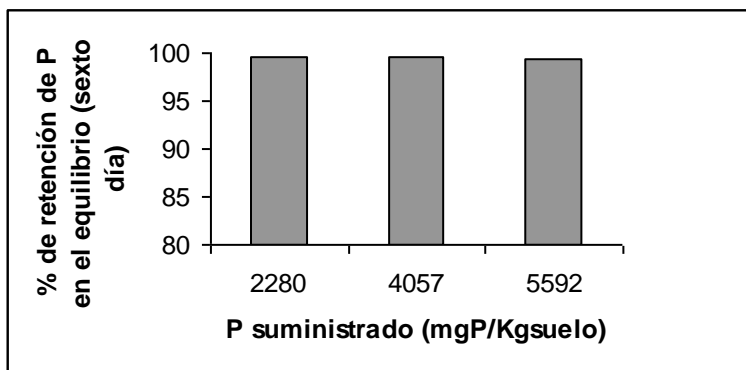
La figura 26 donde se representa la cinética correspondiente a la adsorción de P a partir de 5592 mg P/Kg suelo, presenta un comportamiento similar al de la figura 25, alcanzando un máximo el quinto día con un 99.26 % de retención, posteriormente se alcanza el equilibrio de adsorción durante el sexto día. La retención está comprendida entre un 97.5% y 99.3% siendo significativamente alta en todos los casos.

Figura 26. Cinética de retención de P en el suelo 1 fortificado con 5592 mgP /Kg suelo del fertilizante Triple 15



En la figura 27 se representa la retención de P en función de la cantidad de P suministrada a partir de Triple 15, cuando se alcanza el equilibrio de adsorción entre el P retenido y el P en solución. De igual forma que con la sal pura, no se detectan diferencias apreciables en la retención a medida que aumenta significativamente la dosis suministrada, indicando también la gran capacidad de retención del P proveniente de este fertilizante aún cuando es compuesto y su solubilidad es menor (0.86 g Triple 15/ 100 mL de agua) a la de la sal pura (22.2 g sal/100 mL de agua).

Figura 27. Porcentaje de retención de P en el equilibrio del suelo 1, fortificado con Triple 15 para cada una de las dosis suministradas



Comparando los dos tratamientos aplicados en este suelo se puede observar que para dosis bajas (62.5 a 250 mg P/Kgsuelo) de KH_2PO_4 , y de Triple 15, se presenta una retención total durante el primer día de la aplicación, indicando que los fertilizantes aplicados en las condiciones de este suelo para suplir deficiencias de P, no suplen tales deficiencias.

Para dosis más altas se presenta una retención comprendida entre 95 y 99% para el KH_2PO_4 y entre 98 y 99% para el triple 15 durante el primer día indicando igualmente una fuerte retención y poca disponibilidad de los fertilizantes en las condiciones en que está el suelo, independientemente de donde provenga el P.

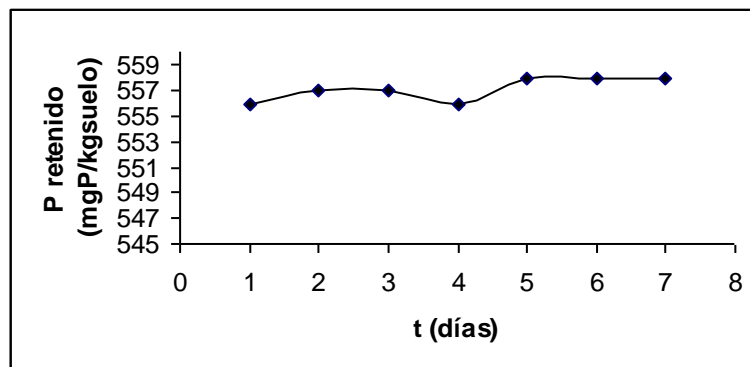
- **Suelo 2 fortificado con KH_2PO_4 :** En la tabla 11 y figura 28 - 31 se relacionan los resultados de la retención de P en función del tiempo cuando se incubaba este suelo con soluciones de KH_2PO_4 cuyas concentraciones comprenden: 562, 1405, 2248 mg P/Kgsuelo, el resultado es el promedio de dos réplicas (tabla 3 del anexo 2).

Tabla 11. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con KH_2PO_4 durante 7 días

Días	P suministrado (mg P/Kgsuelo)					
	562		1405		2248	
	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P
1	556	98.9	1372	97.6	2079	92.5
2	557	99.1	1377	98.0	2092	93.1
3	557	99.0	1380	98.2	2129	94.7
4	556	98.9	1380	98.2	2126	94.6
5	558	99.3	1381	98.3	2143	95.4
6	558	99.3	1380	98.2	2143	95.3
7	558	99.3	1380	98.2	2142	95.3

La figura 28 muestran la cinética de retención a partir de 562. mg P/Kg suelo. Se observa una fuerte retención del nutriente desde el primer día, presentándose una ligera liberación de P a la solución del suelo durante el día cuarto, pero posteriormente vuelve a incrementar para alcanzar el equilibrio de adsorción en el quinto día, con un máximo 99.3% de retención. La liberación de P se puede atribuir probablemente a un impedimento estérico por la entrada de nuevos grupos fosfato dentro de la fase coloidal, sin embargo, se logra superar y continúa la adsorción. Esa alta retención implica una disponibilidad muy baja del nutriente suministrado a partir de esta sal, afectando así tanto la rentabilidad del cultivo como las condiciones ambientales.

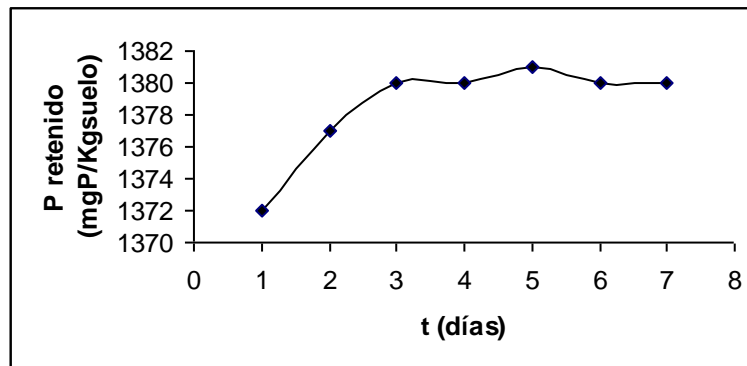
Figura 28. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con 562 mg P/ Kg suelo como KH_2PO_4



En la figura 29 se presenta el desarrollo de la cinética de retención del P con una dosis de 1405.2 mg P/Kg suelo, indicando un incremento paulatino en la retención

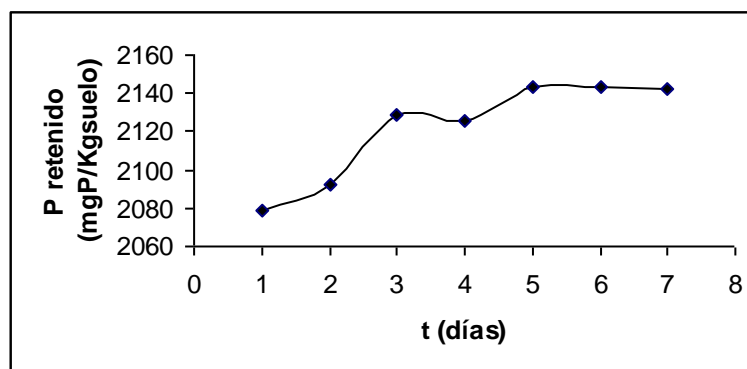
hasta el tercer día, posteriormente, el cambio no es relevante, lo que indica que el sistema llegó al equilibrio de adsorción alcanzando un máximo de adsorción al quinto día con un 98.3% de retención. La alta retención aún cuando la dosis suministrada es muy alta, es también un inconveniente para este suelo, puesto que al aplicar fertilizantes solubles se pierden fácilmente por retención quedando solamente alrededor de un 2% disponible para las plantas.

Figura 29. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con 1405 mg P/ Kg suelo como KH_2PO_4



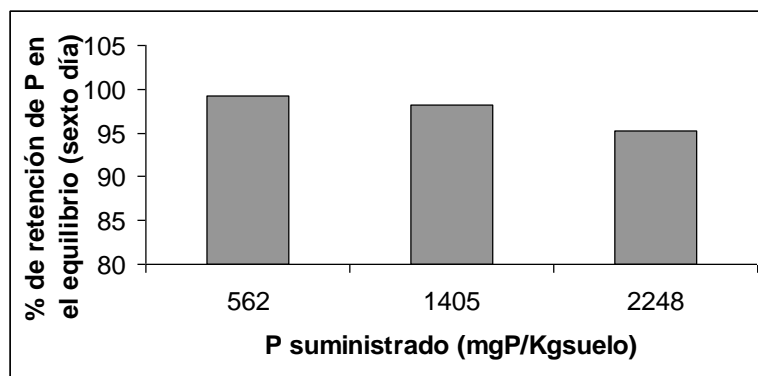
En la figura 30, la cinética al adicionar 2248 mg P/ Kg suelo, dosis muy alta si se compara con los requerimientos del suelo para llegar a un suelo fértil, se presenta el mismo comportamiento descrito que la gráfica anterior en donde se observa una fuerte retención del P suministrado desde el primer día, con incrementos paulatinos hasta el tercero, posteriormente ya no hay cambios significativos indicando que se ha alcanzado el equilibrio de adsorción con un máximo de 95.4% de retención en el quinto día. Aún cuando la dosis suministrada se incrementa en un 60% con respecto a la anterior, la retención disminuye únicamente en un 3%, lo que indica que este suelo tiene una gran capacidad de retención de este nutriente a partir de fertilizantes solubles, causando así serios problemas de disponibilidad.

Figura 30. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con 2248 mg P/ Kg suelo como KH_2PO_4



En la figura 31 se puede apreciar el porcentaje de adsorción de P en función de la cantidad de P suministrada, a partir de una solución de KH_2PO_4 cuando se alcanza el equilibrio entre el P adsorbido y el P en solución, en ella se destaca que el porcentaje de retención disminuye ligeramente cuando se aumenta considerablemente la dosis suministrada, indicando que es posible saturar los sitios de retención con altas dosis de esta sal, aún cuando la capacidad de retención que tiene este suelo es muy alta y de esta manera produce serios inconvenientes de disponibilidad cuando se agregan fertilizantes de alta solubilidad.

Figura 31. Porcentaje de retención de P en el equilibrio del suelo 2, fortificado con KH_2PO_4 , para cada una de las dosis suministradas



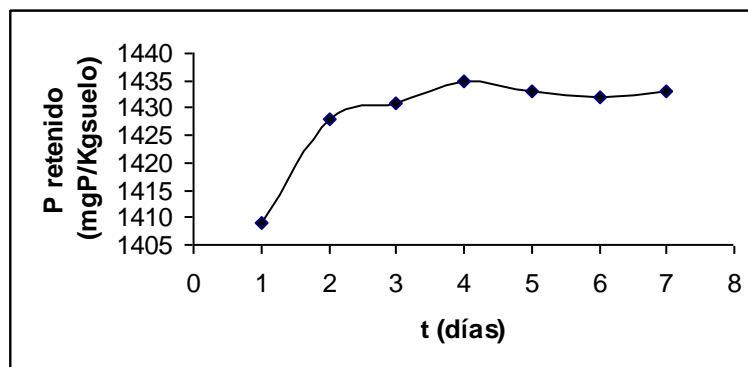
- **Suelo 2 fortificado con el Fertilizante Triple 15.** Los resultados de la incubación del suelo 2 con soluciones de Triple 15 con concentraciones de 1453.2, 2248.2 y 2280 mg P/Kg suelo se relacionan en la tabla 12 y figuras 32- 34, el resultado es el promedio de dos réplicas (tabla 4 del anexo 2).

Tabla 12. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con el fertilizante triple 15 durante 7 días

Días	P suministrado (mg P/Kgsuelo)					
	1453		2248		2880	
	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P	P adsorbido (mgP/kgsuelo)	% Retención de P
1	1409	97.0	2083	92.6	2340	84.2
2	1428	98.2	2134	94.9	2743	98.8
3	1431	98.5	2152	95.7	2759	99.2
4	1435	98.8	2146	95.4	2759	99.2
5	1433	98.6	2173	96.6	2754	99.1
6	1432	98.6	2173	96.7	2754	99.1
7	1433	98.6	2173	96.7	2753	99.1

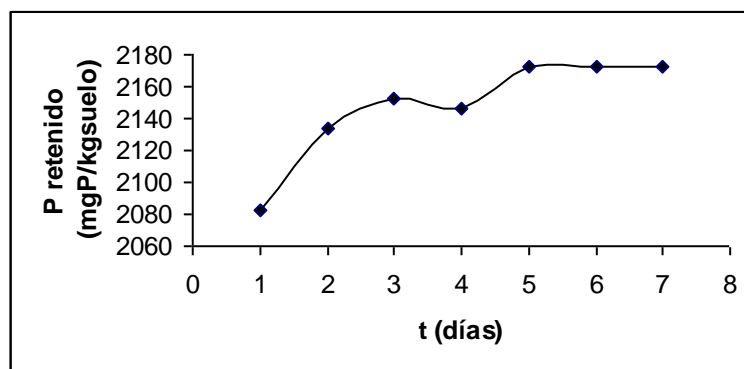
La figura 32 se muestra la cinética a partir de 1453 mg P/ Kg suelo. Se observa una curva asintótica en donde inicialmente hay considerable aumento en la retención del P hasta el segundo día a partir del cual los cambios no son significativos, alcanzando el equilibrio de adsorción en el quinto día y una máxima adsorción con un 98.6% de retención.

Figura 32. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con 1453 mg P/Kg suelo del fertilizante Triple 15



Para la dosis de 2248 mg P/ Kg suelo según la figura 33, la cinética indica un incremento significativo en la retención durante los tres primeros días, nuevamente se presenta una ligera liberación de P a la solución del suelo en el cuarto día como en la mayoría de los casos anteriores y a partir de este día se observa un ligero incremento en la retención hasta alcanzar el equilibrio de adsorción en el quinto día con un máximo de 96.7% de retención.

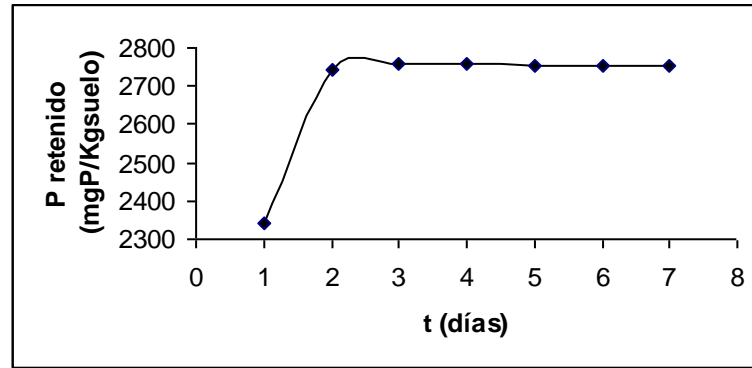
Figura 33. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con 2248 mg P/Kgsuelo del fertilizante Triple 15



En la cinética de 2280 mg P/ Kg suelo figura 34, igualmente se observa una curva asintótica en donde hay una gran retención hasta el segundo día a partir del cual

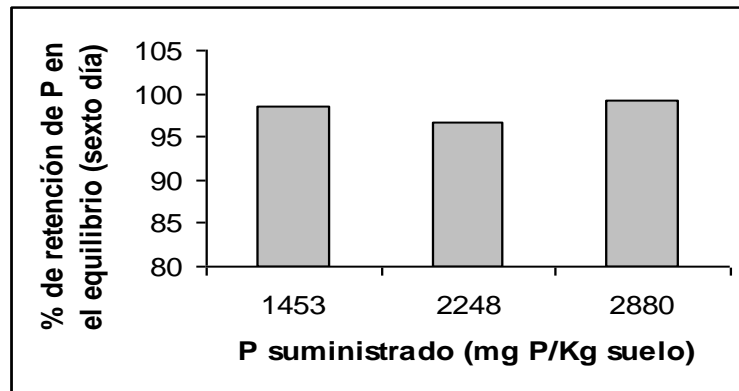
no hay cambios significativos y alcanzando así el equilibrio de adsorción en el tercer día con un máximo de 99.24 % de retención.

Figura 34. Cinética de retención de P en el suelo 2 fortificado con 2880 mg P/Kgsuelo del fertilizante Triple 15



En la figura 35 se representa la retención de P en función de la cantidad de P suministrada a partir de Triple 15, cuando se alcanza el equilibrio entre el P retenido y el P en solución. De igual forma que con la sal pura, no se detectan diferencias apreciables en la retención a medida que aumenta significativamente la dosis suministrada, indicando también la gran capacidad de retención del P proveniente de este fertilizante aún cuando es compuesto, presenta una solubilidad mucho menor a la de la sal pura.

Figura 35. Porcentaje de retención de P en el equilibrio del suelo 2, fortificado con Triple 15, para cada una de las dosis suministradas



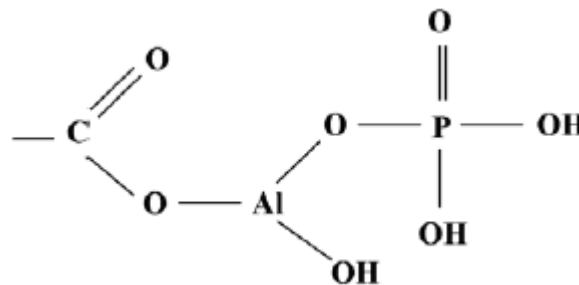
Comparando los dos tratamientos aplicados en este suelo se puede observar que para dosis bajas de KH_2PO_4 , la cinética presenta comportamientos muy similares para todas las dosis aplicadas, observándose generalmente una ligera liberación de P a la solución del suelo entre el tercer y cuarto día debido probablemente a

efectos de impedimento estérico, que luego se superan y continúa un leve incremento hasta llegar al equilibrio. Para dosis muy altas, el comportamiento es similar al de las concentraciones bajas, ya que hay demasiados iones H_2PO_4^- , que saturan los coloides y a su vez se genera una competencia con iones Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , por su exceso, pero al final se obtiene el equilibrio de adsorción. Similar comportamiento se detecta con el fertilizante Triple 15, el tiempo en alcanzar la estabilidad es mayor, mientras que para las concentraciones altas el equilibrio de adsorción se da más rápido, lo que indica que los sitios de adsorción se han saturado, además de presentar una competencia de aniones que se encuentran en la solución al igual que en el suelo 1. Los dos tratamientos de cinética coinciden en un equilibrio al sexto día, ya que es el tiempo intermedio entre los días donde se alcanza mejor estabilidad.

Comparando la retención de P del suelo 1 con la del suelo 2 a partir de la sal pura de KH_2PO_4 y de Triple 15, se aprecia como se mencionó anteriormente que el suelo 1 presenta una mayor capacidad de retención aún cuando su valor de pH es superior y el contenido de Al intercambiable es inferior al de este último, indicando que la retención en el primero se podría atribuir probablemente al alto contenido de MO y/o a la presencia de alófanos.

Inicialmente se considera que la fijación de P en Andisoles ocurre solamente en las superficies activas del alófano y la imogolita. Los mecanismos de fijación de P en el alófano e imogolita incluyen procesos como quimiadsorción, desplazamiento de silicio estructural y precipitación. Sin embargo, se ha reconocido la importancia de los complejos humus-Al en este proceso. La fracción humus en Andisoles forma fácilmente complejos con metales como el Al⁽³²⁾. El carbono atrapado en estos complejos es inactivo y deja de ser parte del C activo de la fracción orgánica como se muestra en la figura 36. Por otro lado, los grupos hidroxilo combinados con el Al acomplejado entran en reacciones de intercambio de ligandos con HPO_4^{2-} y H_2PO_4^- (33).

Figura 36. Representación esquemática de la fijación de fósforo en los complejos humus-Al



5.3. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE FÓSFORO EN LOS SUELOS.

Dada la gran importancia de los fenómenos de adsorción, y considerando la alta capacidad de los dos suelos para retener P a partir de fuentes diferentes, se evalúan las isotermas de adsorción con el propósito de determinar la máxima capacidad de adsorción, así como su máxima energía de adsorción. Se realizan Isotermas de Langmuir y de Freundlich a 25 °C, temperatura cercana a las condiciones normales de campo.

Aplicando las dos formas matemáticas para expresar la adsorción de P en los suelos, los resultados obtenidos se ajustan mejor a las Isotermas de Langmuir que a las de Freundlich (tablas 9 – 13 y figuras 1 - 4 del anexo 2). Las isotermas de Langmuir representan una adsorción en monocapa que idealmente se ajusta a bajas concentraciones ⁽³⁴⁾. Además la isoterma de Langmuir permite obtener información acerca de la máxima capacidad de adsorción (**b**) y la máxima energía de adsorción (**K**).

5.3.1. Isotermas de Langmuir

Se determinan las isotermas no linealizadas y las lineales.

Para obtener las **no linealizadas** se grafica la cantidad de P retenido por unidad de peso de suelo (**X**) en función de la concentración de P en la solución de equilibrio (**C**), como se muestra en la ecuación 49:

$$X = \frac{CbK}{1 + C.K}, \quad (\text{ec. 49})$$

Donde: **X = mg P retenido / Kg suelo**
C = mg P/ L sln

Para obtener las **isotermas lineales** se grafica la concentración de P en la solución de equilibrio (**C**) sobre la cantidad de P retenido por unidad de peso de suelo (**X**) en función de la concentración de P en la solución de equilibrio (**C**), descrita en la ecuación 23:

$$\frac{C}{X} = \frac{1}{K.b} + \frac{C}{b}$$

Los resultados de las isotermas realizadas con las dos fuentes de P para los dos suelos es el promedio de tres replicas (tablas 5, 6, 7 y 8, anexo 2) y se relacionan en las tablas 13, 14 15 y 16.

Tabla 13. Isoterma de Langmuir, suelo 1 fortificado con KH_2PO_4

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	C P (mg / L)	X (mg P / Kg suelo)	C / X (Kg suelo / L sln)
0	0	0	0
1250	0.51	1243.3	4.1×10^{-4}
2500	0.81	2489.3	3.3×10^{-4}
3750	4.02	4950.1	7.9×10^{-4}
6250	19.87	5999.8	3.3×10^{-3}
10000	50.47	9366.6	5.4×10^{-3}
12500	81.85	11473.8	7.1×10^{-3}
18750	316.87	14785.5	2.1×10^{-2}

Tabla 14. Isoterma de Langmuir, suelo 1 fortificado con Triple 15

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	C P (mg / L)	X (mg P / Kg suelo)	C / X (Kg suelo / L sln)
0	0	0	0
1353	0.31	1348.27	2.3×10^{-4}
2724	0.93	2711.15	3.5×10^{-4}
3607	5.72	3533.11	1.6×10^{-3}
5040	8.98	4925.22	1.8×10^{-3}
6440	15.14	6247.74	2.4×10^{-3}
7753	43.37	7196.21	6.0×10^{-3}

Tabla 15. Isoterma de Langmuir, suelo 2, fortificado con KH_2PO_4

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	C P (mg / L)	X (mg P / Kg suelo)	C / X (Kg suelo / L sln)
0	0	0	0
616	0.25	612.93	4.1×10^{-4}
1232	0.88	1221.17	7.3×10^{-4}
2464	19.74	2221.07	8.9×10^{-3}
3696	62.32	2928.43	2.1×10^{-2}
6160	204.6	3639.6	5.6×10^{-2}
9856	465.3	4123.83	1.1×10^{-1}
12320	651.07	4299.1	1.5×10^{-1}

Tabla 16. Isotherma de Langmuir, suelo 2 fortificado con Triple 15

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	C P (mg / L)	X (mg P / Kg suelo)	C / X (Kg suelo / L sln)
0	0	0	0
1353	0.89	1322.21	6.8×10^{-4}
2724	7.8	2588.61	3.0×10^{-3}
3607	33.67	3139.44	1.1×10^{-2}
5040	86.63	3898.95	2.2×10^{-2}
6440	86.63	3898.95	2.2×10^{-2}
7753	204.28	5122.86	4.0×10^{-2}

En las figuras 37 – 40 se representan las isothermas de Langmuir no linealizadas, para ambos suelos y con ambas fuentes de P, en donde se observa que las curvas en todos los casos presentan comportamiento asintótico con un máximo de adsorción, de igual forma como lo reporta Iyamuremye ⁽¹⁸⁾. Por esta razón es importante establecer tales condiciones de equilibrio de adsorción.

Figura 37. Isotherma de Langmuir no linealizada, suelo 1 fortificado con KH_2PO_4

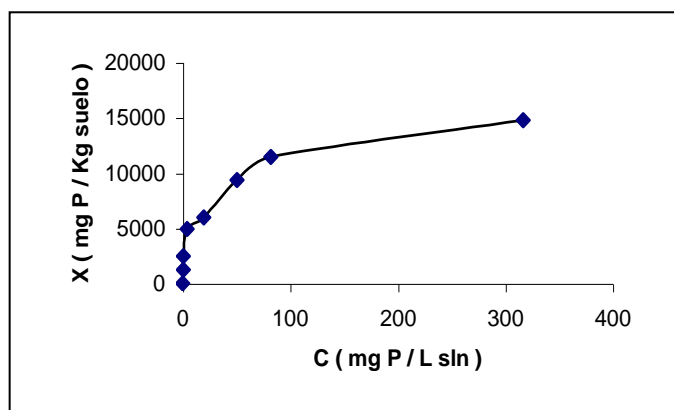


Figura 38. Isoterma de Langmuir no linealizada, suelo 1 fortificado con Triple 15

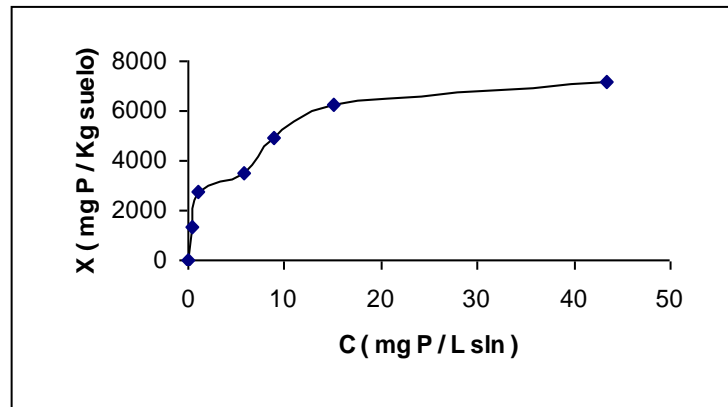


Figura 39. Isoterma de Langmuir no linealizada, suelo 2 fortificado con KH_2PO_4

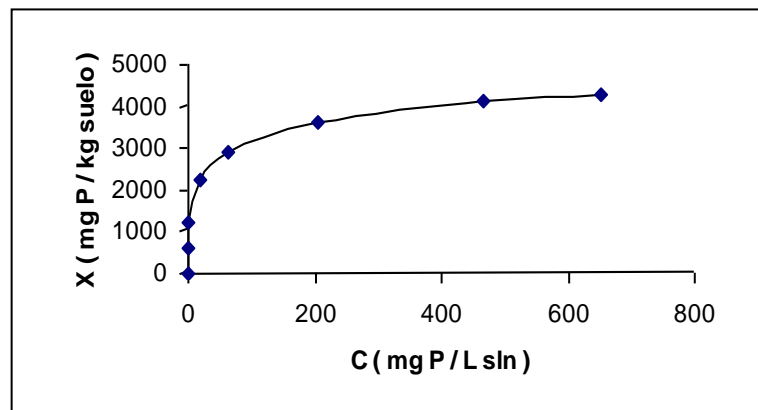
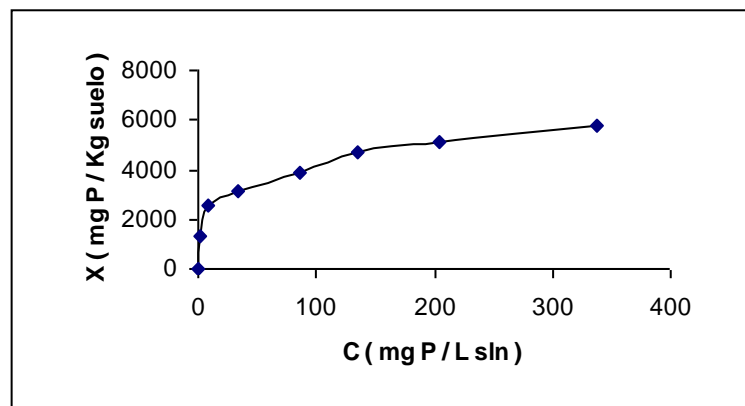


Figura 40. Isoterma de Langmuir no linealizada, suelo 2 fortificado con Triple 15



En las figuras 41 - 44 se representan las isothermas de Langmuir linealizadas para ambos suelos y ambas fuentes de P. En todos los casos se observa una relación lineal con un alto coeficiente de correlación y con bajos valores de pendiente. Este último aspecto indica una alta capacidad de adsorción de P en estos suelos, representada por **b** en la ecuación 23, ya que **b** es inversamente proporcional al valor de la pendiente $1/b$. Por lo tanto, las isothermas obtenidas muestran la alta cantidad de P que se debe adicionar a cada suelo para mantener una determinada concentración en su solución, de acuerdo a Ramírez ⁽³¹⁾.

Figura 41. Isotherma de Langmuir linealizada, suelo 1 fortificado con KH_2PO_4

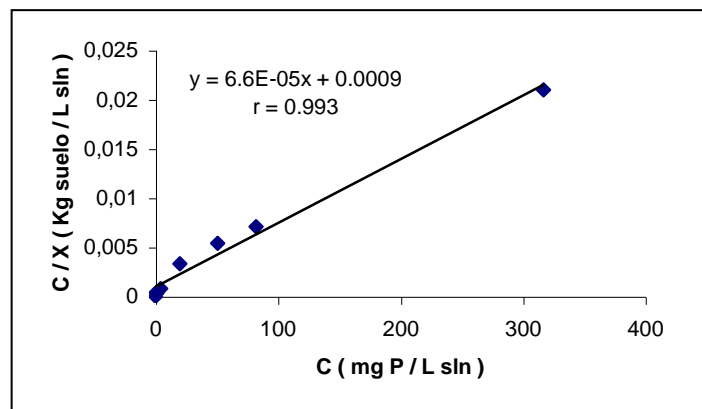


Figura 42. Isotherma de Langmuir linealizada, suelo 1 fortificado con Triple 15

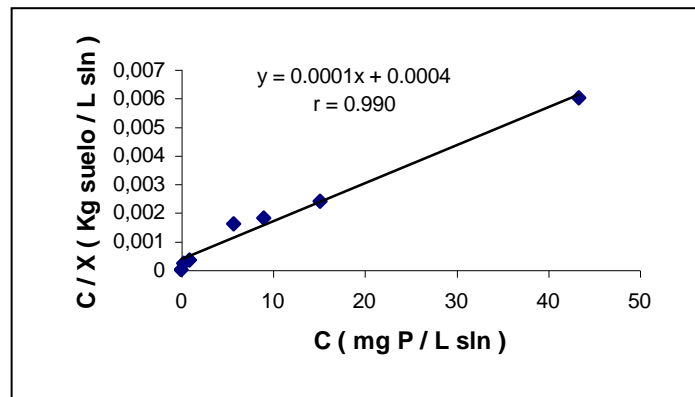


Figura 43. Isoterma de Langmuir linealizada, suelo 2 fortificado con KH_2PO_4

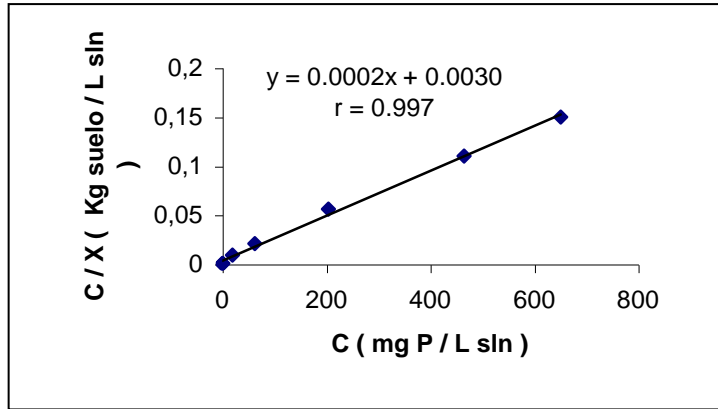
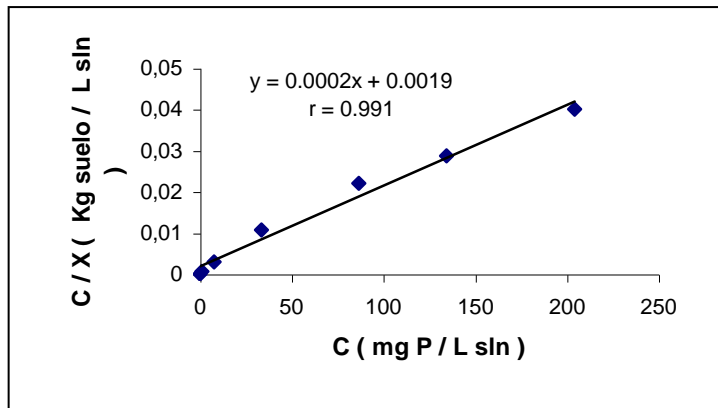


Figura 44. Isoterma de Langmuir linealizada, suelo 2 fortificado con Triple 15



5.3.1.1. Valoración de la Máxima capacidad de Adsorción (**b**) y máxima Energía de Adsorción (**K**). En la tabla 17 se presentan los valores de máxima capacidad de adsorción (**b**), máxima energía de adsorción (**K**) y factor de correlación (**r**), obtenidas a partir de la ecuación lineal de Langmuir, para los suelos 1 y 2 fortificados con KH_2PO_4 y Triple 15, ecuación 50.

$$K = \frac{1}{b.B} \quad (\text{ec. 50})$$

K = máxima energía de adsorción

B = intercepto

b = máxima capacidad de adsorción

Tabla 17. Valores b, K y r para los suelos 1 y 2 fortificados con KH₂PO₄ y Triple 15

Suelo	Tratamiento	b (mg P/Kg suelo)	K (Lsln/mg P)	r
1	KH ₂ PO ₄	15151.52	0.073	0.993
	Triple 15	10000.00	0.250	0.990
2	KH ₂ PO ₄	5000.00	0.067	0.997
	Triple 15	5000.00	0.11	0.991

La máxima capacidad de retención (**b**) en el suelo 1 es mayor cuando se fortifica con KH₂PO₄ que con el fertilizante triple 15. Esta diferencia radica principalmente en la composición tanto de la sal como del fertilizante, ya que este último contiene otros aniones tales como Cl⁻, que compiten por los sitios de adsorción con el H₂PO₄⁻.

En cuanto a la máxima energía de adsorción (**K**) que corresponde la energía con la que está retenido el anión en el suelo se observa que es tres veces más grande para el tratamiento con el triple 15 que para el KH₂PO₄ (Tabla 17), debido a la competencia que ocurre entre los otros aniones que componen el fertilizante y el H₂PO₄⁻ adsorbido y que interaccionan principalmente con la MO, cuyo contenido es alto (9.4%), la cual probablemente retiene más fuertemente a dicho anión de acuerdo a la serie de Corey F⁻ > KH₂PO₄⁻ > SO₄²⁻ > Cl⁻ > NO₃⁻ ⁽⁵⁾, causando deficiencia de P para la nutrición de la planta, ya que este no pasa fácilmente a la solución del suelo.

La máxima capacidad de retención (**b**) para el suelo 2, presenta valores iguales con los dos tratamientos (Tabla 17). Aún cuando este suelo presenta un bajo nivel de MO (2.3%), su contenido de arcillas es alto (35.7%), de tal manera que en este caso la retención se podría atribuir principalmente a este componente de la fase coloidal. Por lo tanto esta similitud obedece precisamente al bajo contenido de MO. Por otra parte, el alto porcentaje de arcillas presente en el suelo 2 no ocasiona gran diferencia en cuanto a la cantidad de adsorción de P para los tratamientos, ya que en estas los sitios de adsorción son menos complejos y más disponibles que en la materia orgánica ⁽³⁵⁾, disminuyendo la competencia entre aniones cuando la incubación se hace con triple 15. El valor de la máxima energía de adsorción (**K**) es 1.6 veces superior para el tratamiento con triple 15 que con KH₂PO₄ atribuible a la competencia con los otros aniones por los sitios de adsorción.

Comparando la retención en los dos suelos se deduce que la máxima capacidad de retención (**b**) para el suelo 1 es dos veces y tres veces superior al del suelo 2 cuando se tratan con Triple 15 y KH₂PO₄ respectivamente. Mientras que la

máxima energía de adsorción para el suelo 1 es dos veces superior a la del suelo dos cuando se fortifica con Triple 15 y es muy similar cuando se fortifica con KH_2PO_4 . Tales diferencias obedecen como se explicó anteriormente debido a las diferencias en los contenidos de MO y arcillas en los dos suelos.

5.4. INFLUENCIA DE LA FORTIFICACIÓN DE LOS SUELOS CON LAS DOS FUENTES DE P SOBRE LAS DIFERENTES FRACCIONES DE FÓSFORO.

La fijación de fósforo es un problema serio en los suelos agrícolas particularmente en los suelos altamente meteorizados y en los derivados de cenizas volcánicas (Andisoles) como es el caso de los suelos analizados ⁽³⁶⁾, como consecuencia de esta retención se disminuye la movilidad del fósforo en el suelo y disminuye la posibilidad de ser absorbido por las plantas ⁽⁸⁾, por ello se ve la necesidad de conocer los sitios y las formas en que se encuentra el fósforo adsorbido y así buscar la manera de aumentar la disponibilidad con el propósito de contribuir a la fertilidad.

5.4.1. Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial para los suelo 1 y 2 sin fortificar.

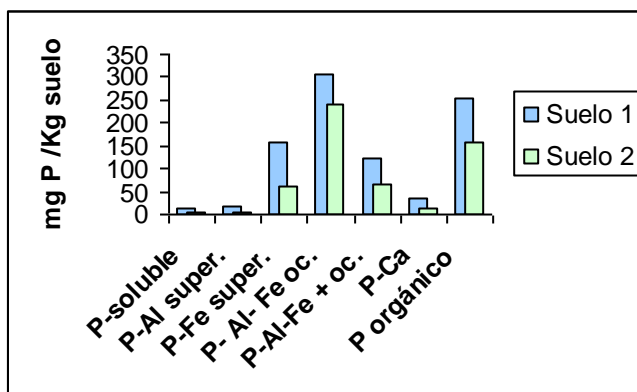
En la tabla 18 y en la figura 45 se presentan las concentraciones de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo 1 y 2. El resultado es el promedio de dos réplicas (tabla 14 del anexo 2).

Tabla 18. Fraccionamiento de P suelo 1 y 2 sin fortificar

Fraccionamiento de Fósforo	Suelo1		Suelo 2	
	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total
P soluble	14.07	1.56	5.86	1.07
P-Al superficial	18.43	2.04	5.55	1.01
P-Fe superficial	156.25	17.29	60.72	11.07
P-Fe-Al ocluido	306.25	33.88	240.44	43.83
P-Fe-Al más ocluido	121.56	13.45	65.04	11.85
P-Ca	34.38	3.80	12.02	2.19
*P-orgánico	252.89	27.98	158.99	28.98
*P-total	903.83	100	548.62	100

*No hacen parte de la extracción secuencial

Figura 45. Contenido de fósforo en cada una de las fracciones del suelo 1 y 2 sin fortificar



En la tabla 18 y en la figura 45 se presentan las concentraciones y los porcentajes de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo 1. El resultado es el promedio de dos réplicas. En este suelo la fracción de P orgánico ocupa el segundo lugar en cantidad, representando el 28 % del P total, estando acorde con lo citado en la literatura por diferentes autores (5, 22 y 29) quienes reportan que la participación del P orgánico en el P total generalmente varía entre 25 y 75%. Además corresponde con el alto contenido de MO presente en este suelo, indicando una reserva potencial de este nutriente tanto para los microorganismos como para los cultivos. Sin embargo, generalmente en los suelos el P orgánico representa el mayor componente del P total.

El primer lugar lo ocupa el P inorgánico y la abundancia relativa de sus formas presentan el siguiente orden: **P unido al Fe y Al ocluidos > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Ca > P unido al Al superficial > P soluble**

La forma mas abundante es el P unido al Fe y Al ocluido, que corresponde al 33.88 % del P total, indicando una alta presencia de estos metales debido al origen del suelo y a su carácter fuertemente ácido. Le sigue en orden P unido al Fe superficial, representando el 17.29 % con respecto al P total, debido probablemente al origen y al pH del suelo analizado en el que este catión se encuentra precipitado probablemente formando dióxidos u óxidos que adsorben el fósforo en forma aniónica como se demuestra en la figura 8. Luego se presenta en orden de abundancia los fosfatos unidos al Fe y Al más ocluidos con un 13.45 % del P total, atribuibles probablemente a variscitas, estrengitas y otros minerales provenientes de las arcillas presentes en este suelo. Representa un 20,64% del P total y un 41.4% del P inorgánico. El fósforo unido al Ca con un 3.80 % del P total, es bajo y se atribuye a la fuerte acidez del suelo, en donde esta forma es soluble y se lava fácilmente a pesar del alto contenido de dicho elemento, ver tabla 3.

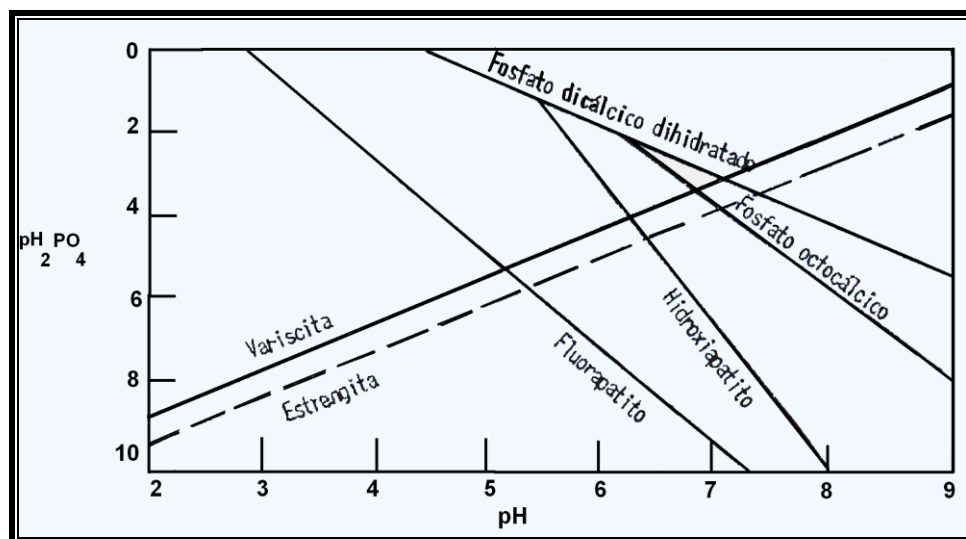
El valor obtenido para el fósforo unido al aluminio es de 2.04 % del P total, siendo éste un bajo porcentaje si se compara con las otras formas, debido a la baja cantidad de aluminio intercambiable que presenta este suelo y que se puede explicar debido al alto contenido de MO que puede estar formando complejo probablemente con alofanos, de tal forma que impide la unión del P al aluminio superficial.

Por último, se presenta el fósforo soluble con una concentración de 14.07 mg P/Kg suelo correspondiente a un 1.56 % del P total, una cantidad mayor a la obtenida para el fósforo disponible (3.3 mg P/Kg suelo). Es de esperar que el disponible sea superior al soluble, ya que cuando se evalúa el fósforo disponible se determina tanto el P soluble como el que está débilmente adsorbido sobre óxidos de hierro y aluminio. Este resultado se puede atribuir probablemente a que la solución extractora de NH₄Cl, es capaz de extraer además el P que está precipitado en forma de fosfatos de aluminio como se muestra en la ecuación 51:



Por otra parte, es posible que se logre la solubilización parcial de variscita que de acuerdo a la figura 46 a este valor de pH empezaría a solubilizar para producir fosfato en solución ya sea como NH₄H₂PO₄ o como (NH₄)₂HPO₄. Al comparar este valor con el reportado por López ⁽²³⁾, para el suelo Vertisol se encuentra que también representa un bajo porcentaje del fósforo total (0.2%); no se encuentra reportes de fósforo soluble para suelos colombianos. Este orden es muy similar al encontrado por Marquínez y Potosí ⁽⁴⁾, para suelos obtenidos también de la región de Cajibío.

Figura 46. Relación entre la solubilidad de los fosfatos del suelo y el pH



El contenido de P total es de 903.83 mg P/Kg suelo que es alto comparado con el valor de P total (591 mg P/Kg suelo) reportado por Blasco para un suelo del Cauca⁽³⁷⁾. Y es similar al encontrado por Marquínez y Potosí⁽⁴⁾, para suelos de la misma región (1051.5 mg P/Kg suelo).

De acuerdo a los porcentajes se observa que las formas de fósforo unido al hierro y al aluminio superficial se encuentran en la misma proporción que las formas ocluidas indicando nuevamente la abundancia de estos elementos en diferentes formas debido a la fuerte acidez y al origen de ellos.

La suma de las fracciones de fósforo unido al hierro y al aluminio en todas sus formas (ocluidas, superficial), representan el 66.66 % del fósforo total, siendo acorde con el tipo de suelo (Andisol)⁽³⁴⁾ que contiene grandes cantidades de estos metales.

En la tabla 18 y en la figura 25 se presentan las concentraciones y los porcentajes de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo 2, el resultado es el promedio de dos réplicas (tabla 14 del anexo 2). La abundancia de las diferentes fracciones de fósforo orgánicas e inorgánicas presentan el siguiente orden: **P unido al Fe y Al ocluidos > P orgánico > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Fe superficial > P unido al Ca > P soluble > P unido al Al superficial** orden similar al reportado por Blasco⁽³⁷⁾, Marquínez y Potosí⁽⁴⁾ en estudios realizados en suelos del Cauca.

La fracción más representativa para este suelo es la del P unido al Fe y Al ocluidos, que corresponde al 43.83 % del P total, indicando un alto contenido de estos elementos como se demuestra por el alto contenido de aluminio intercambiable (6 meq/100g suelo). Le sigue en abundancia la fracción de fósforo orgánico que representa el 28.98 % del fósforo total, aún cuando el nivel de MO es bajo, gran parte del P se encuentra en forma de compuestos orgánicos como ocurre en la mayoría de los suelos. La siguiente fracción es la del P unido al Fe y Al más ocluido con un 11.85 % del P total, esto debido al origen y al pH que presenta este suelo. Luego se presenta en orden de abundancia la fracción de P unido al Fe superficial con un 11.07 % del P total atribuible probablemente a que al valor de pH del suelo la mayor parte del Fe esta precipitado en forma de $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

El fósforo unido al calcio representa el 2.19 % del fósforo total, siendo un valor bajo debido a la fuerte acidez que presenta este suelo, por lo cual el fosfato de calcio es soluble y se lava fácilmente, lo que es acorde con el bajo porcentaje de saturación de calcio encontrado para este suelo. La fracción de fósforo soluble con una concentración de 5.86 mgP/Kg suelo que corresponden al 1.07 %, una cantidad mayor a la obtenida para el fósforo disponible (2.06 mgP/Kg suelo). Es de esperar que el P disponible sea superior al soluble, esto se puede atribuir de forma similar a lo que ocurre en el suelo 1. Finalmente se presenta el fósforo unido al aluminio que corresponde al 1.01 % del fósforo total, aunque este suelo

presenta una alta cantidad de aluminio, el P se encuentra en mayor proporción en la formas ocluidas y mas ocluidas tanto de Fe y Al.

El contenido de P total es de 548.60 mg P/Kg suelo que esta próximo al valor de P total (591 mg P/Kg suelo) reportado por Blasco para un suelo del Cauca ⁽³⁷⁾, pero superior al valor reportado por Marquínez y Potosí ⁽⁴⁾ (257.51 mg P/Kg suelo) para un suelo del Cauca con bajo contenido de MO.

En este suelo se destaca que la fracción de P unido al Fe y al Al ocluida (43.83 %) es mayor respecto al P unido al Fe y Al superficial (12.08 %), esto debido probablemente a la presencia de alófanos deducible de las características físicas y químicas de este suelo.

Si se comparan los dos suelos cuyas diferencia radican principalmente en los contenidos de MO y de arcillas se aprecia que: en general, todas las fracciones son mayores en cantidad para el suelo 1, pero muy similares en porcentaje para los dos suelos. El contenido de P total para el suelo 1 es 1.6 veces superior al del suelo 2, de igual forma existe la misma relación para el P orgánico, diferencia que se atribuye lógicamente a que el suelo 1 presenta un nivel muy superior de MO.

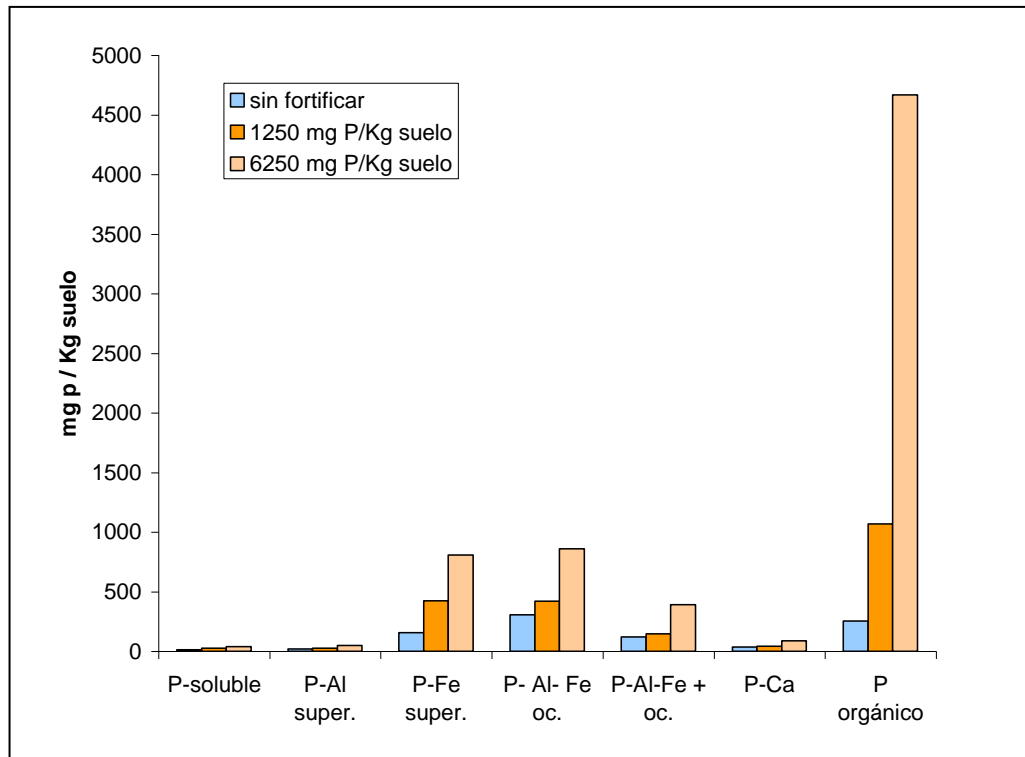
5.4.2. Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial del suelo 1 fortificado con KH_2PO_4 .

En la tabla 19 y en la figura 47 se presentan las concentraciones de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo 1 fortificado con KH_2PO_4 . El resultado es el promedio de tres réplicas (tabla 15 del anexo 2).

Tabla 19. Fraccionamiento de P suelo 1, fortificado con KH_2PO_4

Fraccionamiento de Fósforo	sin Fortificar		Fortificado con 1250 mgP/Kg suelo		Fortificado con 6250 mgP/Kg suelo	
	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total
P soluble	14.07	1.56	24.58	1.15	37.83	0.55
P-Al superficial	18.43	2.04	24.58	1.15	49.3	0.71
P-Fe superficial	156.25	17.29	424.08	19.75	808.58	11.71
P-Fe-Al ocluido	306.25	33.88	419.44	19.53	861.11	12.47
P-Fe-Al más ocluido	121.56	13.45	145.62	6.78	392.29	5.68
P-Ca	34.38	3.80	41.03	1.91	87.91	1.27
P-orgánico	252.89	27.98	1067.81	49.73	4668.55	67.61
P-total	903.83	100	2147.14	100	6905.57	100

Figura 47. Contenido de fósforo en cada una de las fracciones del suelo 1, fortificado con KH_2PO_4



El contenido de P de las diferentes fracciones en el suelo 1 aumenta cuando se fortifica con KH_2PO_4 , siendo mayor a medida que la dosis de aplicación de dicha sal al suelo es mayor. Cuando se fortifica con 1250 mg P/Kg suelo el orden es el siguiente: **P orgánico > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y Al ocluidos > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Ca > P soluble = P unido al Al superficial**, como se muestra en la tabla 19 y en la figura 47. Cuando se fortifica con 6250 mg P/Kg suelo el orden es: **P orgánico > P unido al Fe y Al ocluidos > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Ca > P unido al Al superficial > P soluble**, como se muestra en la tabla 19 y en la figura 47. Si se comparan estas secuencias con las del suelo 1 sin fortificar, se observa que las fracciones inorgánicas correspondientes al P unido al Al y Fe ocluidos y más ocluidos generalmente disminuyen su contenido de P en ambos casos y aumenta el P de la fracción orgánica, indicando así que dichas fracciones se saturan y no retienen más P y que la MO si es capaz de continuar reteniéndolo, aspecto positivo para la fertilidad de este suelo, ya que el P orgánico se puede mineralizar más fácilmente y pasar así a la solución del suelo aumentando su disponibilidad. Esta fracción aumenta cuando la dosis de la sal aplicada es mayor, confirmando así saturación en su capacidad de retención.

5.4.3. Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial del suelo 1 fortificado con el fertilizante Triple 15.

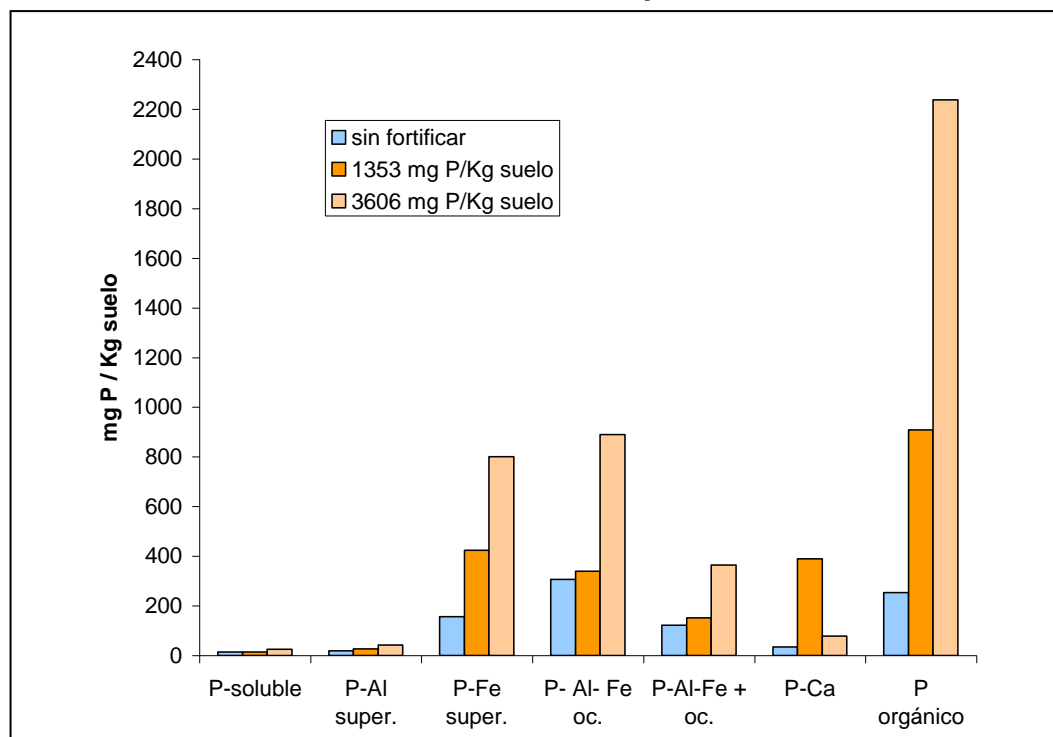
En la tabla 20 y en la figura 48 se presentan las concentraciones de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo 1 fortificado con el fertilizante triple 15. El resultado es el promedio de tres réplicas (tabla 16 del anexo 2).

Tabla 20. Fraccionamiento de P suelo 1, fortificado con el fertilizante triple 15

Fraccionamiento de Fósforo	sin Fortificar		Fortificado con 1353 mgP/Kg suelo		Fortificado con 3606 mgP/Kg suelo	
	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total
P soluble	14.07	1.56	14.37	0.64	25.20	0.57
P-Al superficial	18.43	2.04	26.03	1.16	42.08	0.95
P-Fe superficial	156.25	17.29	423.54	18.80	800.85	18.05
P-Fe-Al ocluido	306.25	33.88	338.89	15.04	888.89	20.03
P-Fe-Al más ocluido	121.56	13.45	151.46	6.72	364.17	8.21
P-Ca	34.38	3.80	389.37	17.28	77.70	1.75
P-orgánico	252.89	27.98	909.14	40.36	2237.95	50.44
P-total	903.83	100	2252.8	100	4436.84	100

Las diferentes fracciones de P en el suelo 1 cuando se fortifica con el Triple 15, aumentan a medida que la dosis de aplicación de dicho fertilizante es mayor. Cuando se fortifica con 1353 mg P/Kg suelo el orden es el siguiente: **P orgánico > P unido al Fe superficial > P unido al Ca > P unido al Fe y Al ocluidos > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Al superficial > P soluble**, como se muestra en la tabla 20 y en la figura 48. Cuando se fortifica con 3606 mg P/Kg suelo el orden es: **P orgánico > P unido al Fe y Al ocluidos > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Ca > P unido al Al superficial > P soluble**, como se muestra en la tabla 20 y en la figura 48. Comparando estas secuencias con las del suelo 1 sin fortificar, se aprecia un comportamiento similar al de este mismo suelo fortificado con KH_2PO_4 , indicando nuevamente una saturación en los sitios inorgánicos de adsorción de este elemento, pasando así a la fracción orgánica del suelo.

Figura 48. Contenido de fósforo en cada una de las fracciones del suelo 1, fortificado con Triple 15



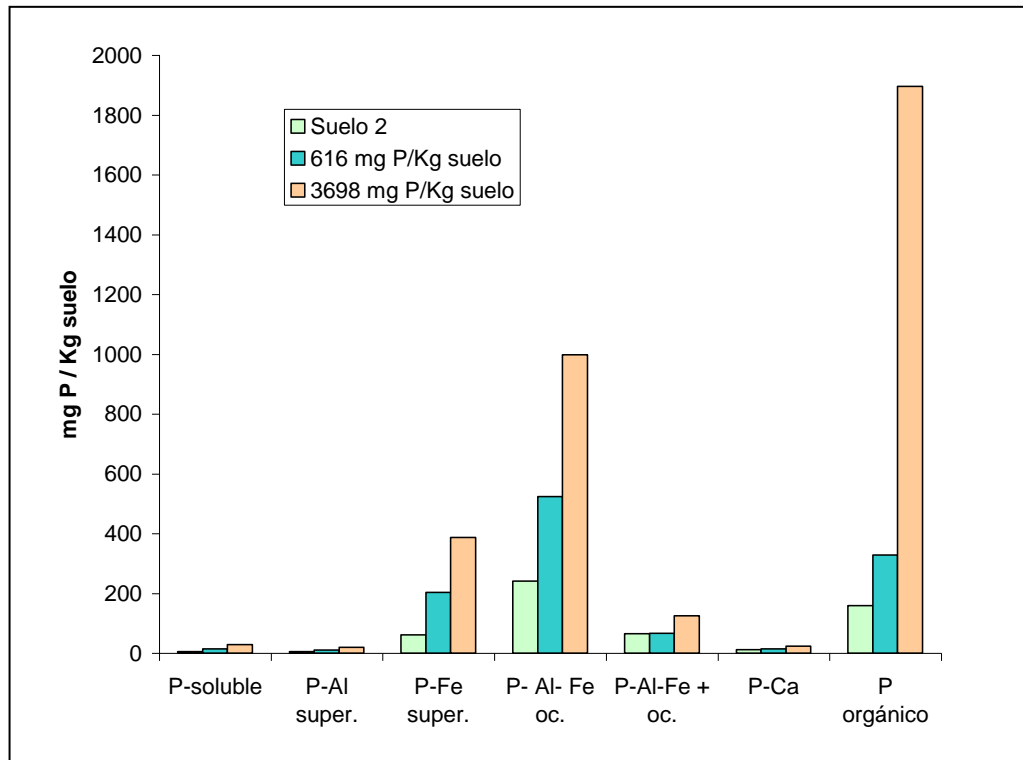
5.4.4. Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial del suelo 2, fortificado con KH_2PO_4 .

En la tabla 21 y en la figura 49 se presentan las concentraciones de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo 2 fortificado con KH_2PO_4 . El resultado es el promedio de tres réplicas (tabla 17 del anexo 2).

Tabla 21. Fraccionamiento de P suelo 2, fortificado con KH_2PO_4

Fraccionamiento de Fósforo	sin Fortificar		Fortificado con 616 mgP/Kg suelo		Fortificado con 3698 mgP/Kg suelo	
	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total
P soluble	5.86	1.07	13.99	1.21	28.19	0.80
P-Al superficial	5.55	1.01	10.28	0.88	19.34	0.56
P-Fe superficial	60.72	11.07	203.90	17.55	387.02	11.13
P-Fe-Al ocluido	240.44	43.83	524.00	45.11	998.62	28.72
P-Fe-Al más ocluido	65.04	11.85	67.08	5.77	125.10	3.60
P-Ca	12.02	2.19	13.99	1.21	23.66	0.66
P-orgánico	158.99	28.98	328.38	28.27	1895.13	54.53
P-total	548.62	100	1161.62	100	3477.06	100

Figura 49. Contenido de fósforo en cada una de las fracciones del suelo 2, fortificado con KH_2PO_4



Las diferentes fracciones de P en el suelo 2 cuando se fortifica con KH_2PO_4 , aumentan a medida que la dosis de aplicación de dicho fertilizante es mayor. Cuando se fortifica con 616 mg P/Kg suelo el orden es el siguiente: **P unido al Fe y Al ocluidos > P orgánico > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y al Al más ocluido > P unido al Ca = P soluble > P unido al Al superficial**, como se muestra en la tabla 21 y en la figura 49. Cuando se fortifica con 3698 mg P/Kg suelo el orden es: **P orgánico > P unido al Fe y Al ocluidos > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y al Al más ocluido > P soluble > P unido al Ca > P unido al Al superficial**, como se muestra en la tabla 21 y en la figura 49. Comparando esta secuencia, la del suelo 2 sin fortificar varía en su orden, aumentando la fracción de P unida al Fe y al Al ocluidos para la dosis menor, debido al alto contenido de Al de dicho suelo y su fracción orgánica permanece constante, probablemente debido a su bajo contenido de MO. Sin embargo, cuando se aumenta la dosis de sal suministrada, se aumenta considerablemente el P unido a la fracción orgánica, ya que todo el Al y Fe presentes en el suelo se han saturado.

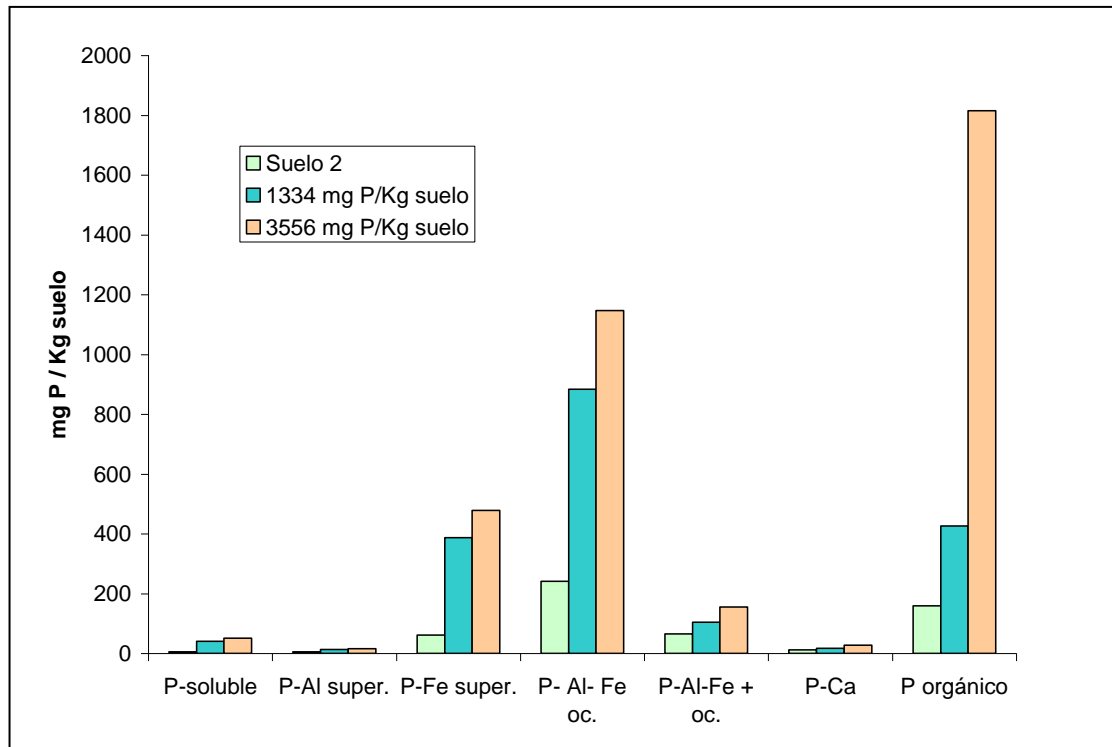
5.4.5. Fracciones de fósforo obtenidas por la extracción secuencial del suelo 2 fortificado con el fertilizante Triple 15.

En la tabla 22 y en la figura 50 se presentan las concentraciones de fósforo de las diferentes fracciones determinadas para el suelo 2 fortificado con el fertilizante triple 15. El resultado es el promedio de tres réplicas (tabla 18 del anexo 2).

Tabla 22. Fraccionamiento de P suelo 2, fortificado con el fertilizante Triple 15

Fraccionamiento de Fósforo	sin Fortificar		Fortificado con 1334 mgP/Kg suelo		Fortificado con 3556 mgP/Kg suelo	
	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total	(mgP/Kg suelo)	% de P referente al P total
P soluble	5.86	1.07	40.32	2.16	50.20	1.36
P-Al superficial	5.55	1.01	13.37	0.71	15.01	0.41
P-Fe superficial	60.72	11.07	386.4	20.65	478.60	12.97
P-Fe-Al ocluido	240.44	43.83	883.39	47.22	1146.77	31.09
P-Fe-Al más ocluido	65.04	11.85	104.52	5.59	154.73	4.20
P-Ca	12.02	2.19	16.53	0.88	27.98	0.76
P-orgánico	158.99	28.98	426.29	22.79	1814.76	49.21
P-total	548.62	100	1870.82	100	3688.05	100

Figura 50. Contenido de fósforo en cada una de las fracciones del suelo 2, fortificado con Triple 15



Las diferentes fracciones de P en el suelo 2 cuando se fortifica con triple 15, aumentan a medida que la dosis de aplicación de dicho fertilizante es mayor. Cuando se fortifica con 1334 mg /Kg suelo el orden es el siguiente: **P unido al Fe y Al ocluidos > P orgánico > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y al Al más ocluido > P soluble > P unido al Ca > P unido al Al superficial**, como se muestra en la tabla 22 y en la figura 50. Cuando se fortifica con 3556 mg P/Kg suelo el orden es: **P orgánico > P unido al Fe y Al ocluidos > P unido al Fe superficial > P unido al Fe y al Al más ocluido > P soluble > P unido al Ca > P unido al Al superficial**, como se muestra en la tabla 22 y en la figura 50. Comparando esta secuencia con la del suelo 2 sin fortificar, se aprecia que aumenta considerablemente la fracción de P unida el Fe y al Al ocluidos para la dosis menor, debido al alto contenido de Al de dicho suelo. Pero al aumentar la dosis, la fracción mayor es la del P orgánico, ya que todo el Al y Fe presentes en el suelo se han saturado y la materia orgánica es la encargada de adsorber el P.

Con el propósito de correlacionar la adsorción de P con las diferentes fracciones de P en los dos suelos, se hace un análisis estadístico. Para ello inicialmente se detecta que por el número de datos, estos no se ajustan a la normalidad, no hay homogeneidad de varianzas, sin embargo, se aplican pruebas paramétricas y no paramétricas.

Entre las pruebas no paramétricas se aplican las de Mann-Whitney, Wilcoxon, cuyos resultados se reportan en la tabla 23 donde se observa una alta significancia para la mayoría de las diferentes fracciones (sig <0.05) indicando, que hay diferencia altamente significativa entre los contenidos de P de las diferentes fracciones para los dos tipos de suelos y con los diferentes tratamientos, con excepción de las fracciones de P orgánico y P soluble.

Tabla 23. Estadística de Contraste^b Pruebas de Mann-Whitney, Wilcoxon

	P soluble	P-Al superficial	P-Fe superficial	P-Fe-Al + ocluido	P-Ca	P-Fe-Al ocluido	P organico
U de Mann-Whitney	74.00	6.00	42.00	30.00	0.00	53.00	60.00
W de Wilcoxon	179.00	111.00	147.00	135.00	105.00	158.00	165.00
Z	-1.106	-4.232	-2.576	-4.510	-4.51	-2.07	-1.746
Sig. Asintót (bilateral)	0.269	0.00	0.01	0.02	0.00	0.38	0.81
Sig. Exacta (2 ^o Sig. Unilateral)	0.285 ^a	0.00 ^a	0.09 ^a	0.01 ^a	0.00 ^a	0.39 ^a	0.85 ^a

a. No corregidos para los empates

b. Variable de agrupación: suelo

La prueba de Kruskal-Wallis cuyos resultados se reportan en la tabla 24, muestran también diferencia significativa para los contenidos de P en la mayoría de las fracciones, con excepción del P unido al Al superficial y P unido al Ca, para los dos suelos y con los diferentes tratamientos.

Tabla 24. Estadística de Contraste^b Pruebas de Kruskal-Wallis

	P soluble	P-Al superficial	P-Fe superficial	P-Fe-Al + ocluido	P-Ca	P-Fe-Al ocluido	P organico
Chi-cuadrado	8.537	3.911	10.249	6.395	3.124	10.759	10.133
gl	2	2	2	2	2	2	2
Sig. asintót	0.014	0.141	0.006	0.041	0.210	0.005	0.006

a. Prueba de Kruskal-Wallis

b. Variable de agrupación: Tratamiento

De las pruebas estadísticas reportadas se deduce que en los únicos casos donde se presenta interacción **suelo – tratamiento**, es en los contenidos de P correspondiente a las fracciones de P soluble y P unido al Ca, por esto se aplica una prueba de análisis de combinaciones no paramétrica de Kruskal-Wallis reportada en la tabla 25 en donde se aprecia una diferencia altamente significativa para ambas fracciones (sig<0.05).

Tabla 25. Prueba de análisis de combinaciones no paramétrica de Kruskal-Wallis para P soluble y P-Ca

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
F1= NH ₄ Cl Inter-grupos	3853.406	5	770.681	19.001	0.000
Intra-grupos	892.300	22	40.559		
Total	4745.706	27			
F5=H ₂ SO ₄ Inter-grupos	198301.113	5	5.841	5.841	0.001
Intra-grupos	149376.618	22			
Total	347677.731	27			

6. CONCLUSIONES

- En el suelo 1 se destaca una textura franco arenosa, baja densidad real, bajo contenido de arcillas, fuerte acidez, alto contenido de MO y baja saturación de aluminio, mientras que en el suelo 2 su textura es franco arcillosa, baja densidad real, alto contenido de arcillas muy fuerte acidez, alto contenido de Al y su saturación es muy alta y bajo contenido de MO.
- Dosis bajas de P (62.5, 125 y 250 mg P/Kg de suelo) aplicadas en forma de KH_2PO_4 y de Triple 15 son adsorbidas completamente por los dos suelos desde el primer día de la incubación.
- El equilibrio adsorción de P para los dos tipos de suelos se alcanza en el sexto día con las dos fuentes de P aplicadas en dosis altas.
- En el suelo 1 hay mayor capacidad de adsorción que en el suelo 2, para ambas fuentes de P, atribuible probablemente a su mayor contenido de MO.
- La adsorción de P en los dos tipos de suelos se ajusta al modelo de isotermas de Langmuir y no se ajustan al modelo Freundlich.
- Los valores de la máxima energía de adsorción para el suelo 1 son 0.073 y 0.250 en presencia de KH_2PO_4 y Triple 15 respectivamente, indicando una mayor retención para este último.
- Los valores de la máxima energía de adsorción para el suelo 2 son 0.067 y 0.11 en presencia de KH_2PO_4 y Triple 15 respectivamente, indicando una mayor retención para este último.
- En el suelo 1 la fracción de fósforo más representativa fue la orgánica atribuible al alto contenido de materia orgánica que este presenta, mientras que para el suelo 2 la fracción mayor fue la del fósforo unido al hierro y al aluminio ocluido debido a la presencia de alófanos en este suelo. En ambos suelos la menor fracción corresponde al P soluble.
- En el suelo 1 cambia el orden de la secuencia del fraccionamiento del P cuando se trata tanto con KH_2PO_4 como con Triple 15, de tal manera que disminuye el contenido de P en las fracciones inorgánicas y aumenta el de la fracción orgánica, indicando saturación en los sitios inorgánicos de adsorción.

- En el suelo 2 ocurre también un cambio en el orden de la secuencia del fraccionamiento del P cuando se trata con ambas fuentes de P, pero con dosis bajas de KH_2PO_4 y de Triple 15 aumenta el contenido de P-Fe-Al ocluidos indicando mayor retención por la fracción inorgánica, y con dosis altas de las dos fuentes aumenta el contenido de P orgánico, indicando saturación de las fuentes inorgánicas.
- Con el presente trabajo se contribuye a la elucidación de los mecanismos de retención de fósforo en suelos caucanos, demostrando su máxima capacidad de adsorción y energía máxima de adsorción, encontrando correlación entre las propiedades físicas y químicas de cada suelo y su capacidad de adsorción de P.
- Se puede inferir de estos resultados que para disminuir la capacidad de retención de P en los dos suelos estudiados y en suelos con condiciones similares, se podría aplicar abonos orgánicos con alto grado de humificación, de tal manera que disminuya la capacidad de intercambio aniónico que es uno de los mecanismos de retención de este nutriente y aumenten la capacidad de intercambio catiónico y el valor de pH disminuyendo así la acidez con el objeto de evitar la adsorción por parte de compuestos inorgánicos de Fe y Al.

BIBLIOGRAFIA

1. VÁZQUEZ, S., MORALES, L. A., 1997. Adsorción de Fósforo en suelos Ácidos de Misiones Argentina. Cátedra de Edafología – Facultad de Ciencias Agrarias - UNNE. Corrientes, Argentina.
2. PENN, J.C., MULLINS, G.L., ZELAZNY, L.W., 2002. Mineralogy in Relation to Phosphorus Sorption and Dissolved Phosphorus Losses in Runoff. *Soil Science Society American Journal*. 69: 1532-1541.
3. CHANG, S., and JACKSON, M., 1957. Fractionation of soil Phosphorus. *Soil Science Society American Journal*. 84:133-144.
4. MARQUÍNEZ, L. y POTOSÍ, S., 2005. Fraccionamiento del Fósforo y su correlación con la Materia Orgánica y otras propiedades de dos suelos del departamento del Cauca. Universidad del Cauca. Popayán, Colombia.
5. FASSBENDER, H., and BOMEMISZA, E. Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. Segunda Edición. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 1987.
6. MUÑOZ, B. 2004. Extracción y caracterización preliminar de huminas de un suelo Andisol del Departamento del Cauca. Trabajo de grado (químico). Universidad del Cauca. Popayán. p. 24-26.
7. HE, Z., GRIFFIN, T. and HONEYCUTT, W., 2004. Evaluation of soil Phosphorus Transformation by Sequential Fractionation and Phosphatase hydrolysis. *Soil Science Society American Journal*. 169: 515-527.
8. GARAVITO, F., 1974. Propiedades Químicas de los Suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Vol 10. No 11. Bogotá.
9. SHARPLEY, A. N, SINGH U., UEHARA G., and KIMBLE, J. 1989. Model of Soil and Plant Phosphorus Dynamics in Calcareous and Highly Weathered Soils. *Soil Science Society American Journal*. 53:153-158.
10. BORGGAARD, O.K., JORGENSEN, S.S, MOBERG, J.P., and RABEN-LANGE, B. 1990. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminum and iron oxides in sandy soils. *Journal Soil Science*. 41: 443-449.
11. ZHANG, M.; ALVA, A. K.; Li, Y. C.; CALVERT, D. V. 1997. Fractionation of Iron, Manganese, Aluminium, and Phosphorus in Selected sandy soils under Citrus Production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 794 - 801.

12. TULLER, M. 2001. Physical and Chemical Processes of water and solute Transport/Retention in soil. SSSA. No 56. GARDNER, L. R. 1990. The role of rock weathering in the phosphorus budget of terrestrial watersheds. *Biogeochemistry*. 11: 97-110.
13. BURNHAM, C. P. and LÓPEZ-HERNÁNDEZ, D. 1982. Phosphate retention in different Soil Taxonomy Classes. *Soil Science*. 134: 376-380.
14. TSAI, S.M. y ROSSETTO R. 1992. Transformacoes microbianas do fósforo. In *Microbiologia do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo. Campinas, Brasil.
15. GIRALDO, E. 2002. Agroquímica: Un Estudio de los Nutrientes Esenciales en la Producción Agrícola. Universidad del Cauca. Popayán.
16. PORTA. C. 1994. Jaime. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. p. 225-233.
17. SOLLINS, P., ROBERSTON G. P. and UEHARA G. 1988. Nutrient mobility in variable and permanent-charge soils. *Biogeochemistry*. 6: 181-199.
18. IYAMUREMYE, F. and DICK, R.P. 1996. Organic Amendments and Phosphorus dynamics: I. Phosphorus Chemistry and sorption. *Soil Science*. 161: 426-435.
19. SPOSITO, G. 1993. The surface Chemistry of soils. En: Clarendon Press, Oxford, England. (1984). Citado por: SANYAL, K.S., DE DATTA, K.S., and CHANG, Y.P. Phosphate sorption-Desorption Behavior of some Acidic soils of South and Southcast Asia. *Soil Science Society American Journal*. 57: 937-945.
20. FOX, R., KAMPRATH L. 1970. Phosphate sorption isotherns for evaluating the phosphate requeriments of soils. *Soil Science Society American* 34: 902-907.
21. KUNISHI, H.M. and VICKERS, J. C., 1980. Adsorption Curves and Phosphorus Requirements of Acid Soils. *Soil Science*. 129: 29-35.
22. STEVENSON, F. 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New York, Wiley. p. 380.
23. LÓPEZ, A., and GARCÍA, A., 2001. Phosphate fractions and availability in vertisols of south-western Spain. *Soil Science*. Vol. 166, 8:549-565.

24. PETERSEN, G. and COREY, R. 1966. A Modified Chang and Jackson Procedure for Routine Fractionation of Inorganic Soil Phosphates. *Soil Science Society American Journal*. 30:563-565.
25. WILLIAMS J., SYRES J. and WALKER, T. 1967. Fractionation of Soil Inorganics Phosphate by a Modification of Chang and Jackson Procedure. *Soil Science Society American Journal*. 31:736 –739.
26. CROSS, A.F. and SCHELESINGER, W.H. 1995. A Literature review and evaluation of the Hedley Fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil Phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*. 64:197-214.
27. GUO, F., YOST, R.S., HUE, N. V., EVENSEN, C.I., and SILVA, J.A. 2000. Changes in Phosphorus fractions in soils under intensive plant growth. *Soil Science Society American Journal*. 64:1681-1689.
28. BRAVO, I. y GIRALDO, E. Manual de prácticas de química agrícola: Análisis de suelos. Departamento de química. Universidad del Cauca. 2003.
29. BOWMAN, R. 1989. A Sequential Extraction Procedure with Concentrated Sulfuric Acid and Dilute Base for Soil Organic Phosphorus. *Soil Science Society American Journal*. 53: 362-366.
30. SILVA, F. 2000. Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Sociedad Colombiana De La Ciencia Del Suelo. Tercera edición. Santa fé de Bogotá.
31. RAMÍREZ, F. Y OSORIO, W., 2005. Efecto de los Ácidos Orgánicos de Bajo peso Molecular (AOBPM) sobre la Fijación de Fósforo en Andisoles. Sociedad Colombiana de la Ciencia del suelo. Medellín, Colombia.
32. ZEHETNER, F., W.P. MILLER, and WEST. L.T. 2003. Podogenesis of volcanic ash soils in Andean Ecuador. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:1797 – 1809.
33. Sollins, P. 1991. Effects of soil Microstructure on Phosphorus Sorption in soils of the Humid Tropics. Saskatchewan Institute of Pedology. Saskatoon, Canada.
34. ALMEIDA, J. A., TORRENT, J. y BARRÓN, V. 2003. Cor de Solo, Formas do Fósforo e Adsorção de Fosfatos em Latossolos Desenvolvidos de Basalto do Extremo-Sul do Brasil. *Ci. Solo*. 27:985-1002.

35. ESPINOSA, J., 2003. Fijación de Fósforo en suelos derivados de Cenizas Volcánicas. Departamento de Suelos y Fertilizantes Santa Catalina. Quito, Ecuador.
36. SANCHEZ, P., and UEHARA, G. 1980. Management consideration for acid soil with high phosphorus fixation capacity. In the role of phosphorus in agriculture. F. E. Khasawneh (ed.) ASA, Madison, WI. p 471-514.
37. BLASCO, L., BOHORQUEZ, N. 1968. Fractionation of phosphorus in tropical soils of Colombia. *Agrochimica* 12: 173-178.

ANEXOS

Anexo 1. Parámetros de comparación para niveles de fertilidad en suelos de clima medio (SCCS. 2000)

Tabla 1. Nivel de densidad real

Nivel	Bajo	Normal	Alto	Muy alto
Densidad (g/cm ³)	2.1 – 2.3	2.3 – 2.5	2.6 – 2.8	> 2.8

Tabla 2. Nivel de MO en suelo de clima medio

Nivel	Bajo	Medio	Alto
% MO	< 3	3 - 5	> 5

Tabla 3. Clasificación de acidez de suelos de acuerdo al valor de pH

pH	Clasificación
4.0 - 4.5	Acidez extrema
4.5 - 5.0	Acidez muy fuerte
5.0 - 5.5	Acidez fuerte
5.5 - 6.0	Acidez media
6.0 - 6.5	Acidez suave
6.5 - 7.0	Acidez muy suave
7.0 - 8.0	Alcalinidad suave
8.0 - 8.5	Alcalinidad moderada
8.5 - 9.0	Alcalinidad moderada
9.0 - 9.5	Alcalinidad fuerte
9.5 - 10.0	Alcalinidad muy fuerte

Tabla 4. Toxicidad de aluminio en el suelo (S.C.C.S. 2000)

Al Int. meq/100g. suelo	Evaluación	Efectos tóxicos
< 1.5 meq	Bajo	No tóxico
1.6 a 3.0 meq	Medio	Mod. Tóxico
> 3.0 meq	Alto	Tóxico, especialmente en leguminosas
% Saturación de aluminio	>60 Reducción severa del crecimiento de plantas	30-60 Reduce moderadamente el crecimiento y desarrollo
		<30 Generalmente no tóxica

Tabla 5. Clasificación del Suelo de acuerdo a niveles de Ca, Mg y K

Nutriente	(meq/100 g suelo)		
	Bajo	Medio	Alto
Ca	< 3.00	3.00 - 6.00	> 6.00
Mg	< 1.50	1.50 - 2.50	> 2.50
K	< 0.15	0.15 - 0.30	> 0.30

Tabla 6. Disponibilidad del fósforo para el método de Bray II

Nivel crítico	Disponibilidad
< 15 ppm	Bajo
15 – 30 ppm	Medio
> 30 ppm	Alto

Anexo 2

Tabla 1. Cinética del suelo1 fortificado con KH₂PO₄ durante 7 días

Dosis (ppm P)	Día 1 (ppm P)	Día 2 (ppm P)	Día 3 (ppm P)	Día 4 (ppm P)	Día 5 (ppm P)	Día 6 (ppm P)	Día 7 (ppm P)
1425	1419,84	1412,55	1413,88	1407,90	1408,05	1408,01	1408,47
	1420,08	1412,91	1414,32	1408,10	1408,67	1408,43	1408,27
promedio	1419.96	1412.73	1414.10	1408.00	1408.36	1408.22	1408.37
2850	2809,5	2824,20	2825,97	2834,49	2819,80	2819,46	2819,70
	2810,28	2823,64	2826,41	2833,89	2820,38	2819,86	2819,04
promedio	2809.89	2823.92	2826.19	2834.19	2820.09	2819.66	2819.37
5700	5416,12	5560,40	5595,07	5600,80	5608,38	5603,0	5605,90
	5417,32	5560,50	5596,07	5601,22	5609,18	5603,66	5606,96
promedio	5416.72	5560.45	5595.57	5601.01	5608.78	5603.33	5606.43

Tabla 2. Cinética suelo 1 fortificado con el fertilizante triple 15 durante 7 días

Dosis (ppmP)	Día 1 (ppmP)	Día 2 (ppmP)	Día 3 (ppmP)	Día 4 (ppmP)	Día 5 (ppmP)	Día 6 (ppmP)	Día 7 (ppmP)
2280.29	2264,01	2269,50	2271,07	2271,82	2270,50	2269,79	2269,87
	2264,75	2270,26	2270,47	2270,82	2269,50	2270,19	2270,07
promedio	2264.38	2269.88	2270.77	2271.32	2270.00	2269.99	2269.97
4056.76	3997,02	4021,03	4027,59	4026,41	4034,76	4035,41	4035,69
	3997,42	4020,23	4027,19	4027,21	4035,16	4034,61	4034,89
promedio	3997.22	4020.63	4027.39	4026.81	4034.96	4035.01	4035.29
5592.32	5460,37	5515,88	5525,52	5529,50	5551,24	5550,0	5549,83
	5461,17	5515,48	5526,12	5529,54	5550,64	5550,22	5550,63
promedio	5460.77	5515.68	5525.82	5529.52	5550.94	5550.11	5550.23

Tabla 3. Cinética suelo 2 fortificado con KH_2PO_4 durante 7 días

Dosis (ppmP)	Día 1 (ppmP)	Día 2 (ppmP)	Día 3 (ppmP)	Día 4 (ppmP)	Día 5 (ppmP)	Día 6 (ppmP)	Día 7 (ppmP)
562.06	556,30	556,74	556,89	556,23	557,44	557,60	557,77
	555,90	557,14	556,49	556,63	558,24	558,20	558,17
promedio	556.10	556.94	556.69	556.43	557.84	557.90	557.97
1405.15	1371,27	1377,0	1380,0	1379,80	1380,5	1380,45	1380,48
	1371,87	1376,8	1380,32	1380,44	1381,5	1379,85	1380,08
promedio	1371.57	1376.90	1380.16	1380.12	1381.00	1380.15	1380.28
2247.63	2079,00	2092,72	2128,49	2126,62	2142,97	2142,72	2142,48
	2079,70	2092,0	2128,69	2126,06	2143,17	2142,82	2142,28
promedio	2079.35	2092.36	2128.59	2126.34	2143.07	2142.77	2142.38

Tabla 4. Cinética suelo 2 fortificado con el fertilizante Triple 15 durante 7 días

Dosis (ppmP)	Día 1 (ppmP)	Día 2 (ppmP)	Día 3 (ppmP)	Día 4 (ppmP)	Día 5 (ppmP)	Día 6 (ppmP)	Día 7 (ppmP)
117,9	1409,42	1427,01	1431,04	1434,89	1432,30	1432,68	1432,28
	1409,36	1428,01	1431,24	1435,49	1432,46	1432,68	1433,08
promedio	1409.39	1427.51	1431.14	1435.19	1432.60	1432.28	1432.68
182,4	2082,84	2133,5	2151,41	2146,09	2172,94	2173,06	2172,96
	2082,44	2134,5	2151,81	2145,49	2172,34	2173,46	2173,36
promedio	2082.64	2134.00	2151.61	2145.79	2172.64	2173.26	2173.16
225,54	2339,24	2742,66	2759,07	2758,50	2754,33	2753,54	2753,40
	2340,04	2743,26	2758,87	2758,66	2753,73	2753,94	2753,42
promedio	2339.64	2742.96	2758.97	2758.58	2754.03	2753.74	2753.41

Tabla 5. Isotherma de Langmuir suelo 1 fortificado con KH_2PO_4

Dosis (ppmP)	C (ppmdeP)	X (mgP/KgS)	C/X (KgS/Lsln)
0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
promedio	0.0	0.0	0.0
100,0	0,219	1246,98	0,000176
	0,627	1241,79	0,000505
	0,675	1241,25	0,000544
promedio	0.51	1243.34	0.00041
200,0	0,747	2490,04	0,0003
	0,891	2488,86	0,000358
	0,795	2489,13	0,00032
promedio	0.81	2489.34	0.00033
400,0	4,52	4947,11	0,000839
	3,74	4952,17	0,000757
	3,81	4951,02	0,000771
promedio	4.02	4950.1	0.00079
500,0	16,25	6045,36	0,00269
	21,68	5976,61	0,00363
	21,68	5977,51	0,00363
promedio	19.87	5999.83	0.0033
800,0	48,65	9389,06	0,00518
	54,08	9321,67	0,0058
	48,68	9389,19	0,00518
promedio	50.47	9366.64	0.0054
1000,0	76,8	11536,53	0,00666
	83,47	11453,47	0,00729
	85,27	11431,27	0,00746
promedio	81.85	11473.76	0.0071
1500,0	284,35	15191,82	0,0187
	331,33	14604,36	0,0227
	334,93	14560,34	0,023
promedio	316.87	14785.51	0.021

Tabla 6. Isoterma de Langmuir suelo 1 fortificado con Triple 15

Dosis (ppmP)	C (ppmdeP)	X (mgP/KgS)	C/X (KgS/Lsln)
0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
promedio	0.0	0.0	0.0
108,21	0,31	1348,33	0,00022665
	0,32	1348,11	0,00024382
	0,31	1348,37	0,00022664
promedio	0.31	1348.27	0.00023
217,87	0,92	2711,02	0,00034263
	0,95	2710,73	0,00035119
	0,92	2711,7	0,00035119
promedio	0.93	2711.15	0.00035
288,46	5,91	3530,64	0,0016737
	5,91	3530,82	0,0016736
	5,33	3537,86	0,0015071
promedio	5.72	3533.11	0.0016
403,09	8,79	4928,57	0,0017844
	9,37	4920,24	0,0019047
	8,79	4926,84	0,001785
promedio	8.98	4925.22	0.0018
515,08	15,72	6241,03	0,0025189
	15,14	6247,8	0,0024238
	14,56	6254,39	0,0023289
promedio	15.14	6247.74	0.0024
620,08	44,14	7199,09	0,0061311
	44,14	7199,09	0,0061311
	41,83	7190,44	0,005874
promedio	43.37	7196.21	0.006

Tabla 7. Isotherma de Langmuir, suelo 2 fortificado con KH_2PO_4

Dosis (ppmP)	C (ppmdeP)	X (mgP/KgS)	C/X (KgS/Lsln)
0,0	0.0	0,0	0,0
	0.0	0,0	0,0
	0.0	0,0	0,0
promedio	0.0	0.0	0.0
50,0	0,24	613,00	0,000397
	0,26	612,7	0,000437
	0,24	613,1	3,97E-04
promedio	0.25	612.93	4.10E-04
100,0	0,85	1221,6	7,00E-04
	0,88	1221,3	7,20E-04
	0,92	1220,6	7,60E-04
promedio	0.88	1221.17	7.30E-04
200,0	20,14	2216,1	9,08E-03
	20,15	2216,00	9,09E-03
	18,92	2231,1	8,48E-03
promedio	19.74	2221.07	0.0089
300,0	61,71	2936,00	2,10E-02
	62,94	2920,8	2,15E-02
	62,32	2928,5	2,13E-02
promedio	62.32	2928.43	0.021
500,0	201,9	3672,9	5,50E-02
	204,1	3645,8	5,60E-02
	207,8	3600,1	5,77E-02
promedio	204.6	3639.6	0.056
800,0	464,5	4133,6	1,10E-01
	462,00	4164,7	1,10E-01
	469,4	4073,2	1,20E-01
promedio	465.3	4123.83	0.11
1000,0	635,6	4489,7	1,40E-01
	657,6	4218,4	1,60E-01
	660,00	4189,2	1,60E-01
promedio	651.07	4299.1	0.15

Tabla 8. Isotherma de Langmuir suelo 2 fortificado con Triple 15

Dosis (ppmP)	C (ppmdeP)	X (mgP/KgS)	C/X (KgS/Lsln)
0,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0
promedio	0.0	0.0	0.0
108,21	0,93	1321,62	0,00070822
	0,89	1322,35	0,0006713
	0,86	1322,65	0,00065285
promedio	0.89	1322.21	0.00068
217,87	7,8	2588,29	0,0030131
	7,8	2588,52	0,0030036
	7,8	2589,01	0,0029936
promedio	7.8	2588.61	0.003
288,46	33,07	3146,79	0,0105
	34,28	3132,2	0,0109
	33,67	3139,34	0,0107
promedio	33.67	3139.44	0.0107
403,09	86,83	3896,5	0,0223
	86,83	3896,5	0,0223
	86,23	3903,85	0,0221
promedio	86.63	3898.95	0.022
515,08	133,96	4695,72	0,029
	134,56	4688,05	0,0287
	134,56	4688,28	0,0287
promedio	86.63	3898.95	0.022
620,08	205,08	5112,81	0,0401
	205,08	5113,19	0,0401
	202,67	5142,59	0,0394
promedio	204.28	5122.86	0.04

Tabla 9. Isoterma de Freundlich, suelo 1 fortificado con KH_2PO_4

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	Log X (mg P/Kg suelo)	Log C P mg / L sln
1250	3.09	-0.34
2500	3.4	-0.09
3750	3.69	0.61
6250	3.78	1.3
10000	3.97	1.7
12500	4.06	1.91
18750	4.17	2.5

Tabla 10. Isotermas de Freundlich, suelo 1 fortificado con Triple 15

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	Log X (mg P/Kg suelo)	Log C P mg / L sln
1353	3.13	-0.51
2724	3.43	-0.03
3607	3.55	0.76
5040	3.69	0.95
6440	3.8	1.19
7753	3.86	1.63

Tabla 11. Isoterma de Freundlich, suelo 2 fortificado con KH_2PO_4

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	Log X (mg P/Kg suelo)	Log C P mg / L sln
616	2.79	-0.61
1232	3.09	-0.06
2464	3.35	1.29
3696	3.47	1.8
6160	3.56	2.31
9856	3.62	2.67
12320	3.63	2.81

Tabla 12. Isoterma de Freundlich, suelo 2 fortificado con Triple 15

P suministrado (mgP/Kgsuelo)	Log X (mg P/Kg suelo)	Log C P mg / L sln
1353	3.12	-0.05
2724	3.41	0.89
3607	3.5	1.53
5040	3.6	1.94
6440	3.67	2.13
7753	3.71	2.31

Tabla 13. Constantes n y K obtenidas a partir de la ecuación lineal de Freundlich para los suelos 1 y 2 fortificados con KH₂PO₄ y Triple 15

Suelo	Tratamiento	n (L sln/Kg suelo)	K (mgP/Kg suelo)	r
1	KH ₂ PO ₄	0.37	1.0x10 ⁻⁹	0.972
	Triple 15	0.34	2.5x10 ⁻¹⁰	0.975
2	KH ₂ PO ₄	0.24	2.3x10 ⁻¹³	0.984
	Triple 15	0.24	1.17x10 ⁻¹³	0.995

Tabla 14. Fraccionamiento de P suelo 1 y 2 sin fortificar

Fraccionamiento de Fósforo	Suelo1	Suelo 2
	(ppm)	(ppm)
P soluble	14,38	5,55
	13,75	6,16
promedio	14.07	5.86
P-Al superficial	18,12	5,55
	18,75	5,55
promedio	18.43	5.55
P-Fe superficial	156,25	60,42
	156,25	61,03
promedio	156.25	60.72
P-Fe-Al ocluido	306,25	240,44
	306,25	240,44
promedio	306.25	240.44
P-Fe-Al más ocluido	121,87	64,73
	121,25	65,35
promedio	121.56	65.04
P-Ca	34,38	11,71
	34,38	12,33
promedio	34.38	12.02
P-orgánico	252,21	159,62
	253,56	158,36
promedio	252.89	158.99
P-total (promedios)	903.83	548.62

Tabla 15. Fraccionamiento de P suelo 1, fortificado con KH_2PO_4

Fraccionamiento de Fósforo	Fortificado con 1250 ppm P	Fortificado con 6250 ppm P
P soluble	23,75	38,15
	25	38,15
	25	37,21
promedio	24.58	37.83
P-Al superficial	25	50,32
	25	49,39
	23,75	49,39
promedio	24.58	49.3
P-Fe superficial	425,02	808,25
	423,14	808,75
	424,08	808,75
promedio	424.08	808.58
P-Fe-Al ocluido	425	866,67
	416,67	858,33
	416,67	858,33
promedio	419.44	861.11
P-Fe-Al más ocluido	146,25	391,87
	145	391,87
	145,62	393,12
promedio	145.62	392.29
P-Ca	40,62	88,12
	41,87	88,12
	40,62	87,5
promedio	41.03	87.91
P-orgánico	1065,16	4705,8
	1068,93	4645,82
	1069,93	4654,03
promedio	1067.81	4668.55
P-total (promedio)	2147.14	6905.57

Tabla 16. Fraccionamiento de P suelo 1, fortificado con el fertilizante triple 15

Fraccionamiento de Fósforo	Fortificado con 1352.79 ppm P	Fortificado con 3606.20 ppm P
P soluble	14,37	25
	14,37	25
	14,37	25,62
promedio	14.37	25.20
P-Al superficial	25,62	41,87
	26,87	41,87
	25,62	42,5
promedio	26.03	42.08
P-Fe superficial	423,12	803,12
	423,75	798,75
	423,75	800,62
promedio	423.54	800.85
P-Fe-Al ocluido	350	883,33
	333,33	883,33
	333,33	900
promedio	338.89	888.89
P-Fe-Al más ocluido	151,25	363,75
	151,87	363,75
	151,25	365
promedio	151.46	364.17
P-Ca	389,37	77,5
	389,37	78,12
	389,37	77,5
promedio	389.37	77.70
P-orgánico	898,42	2239,89
	914,5	2243,82
	914,5	2230,14
promedio	909.14	2237.95
P-total (promedio)	2252.8	4436.84

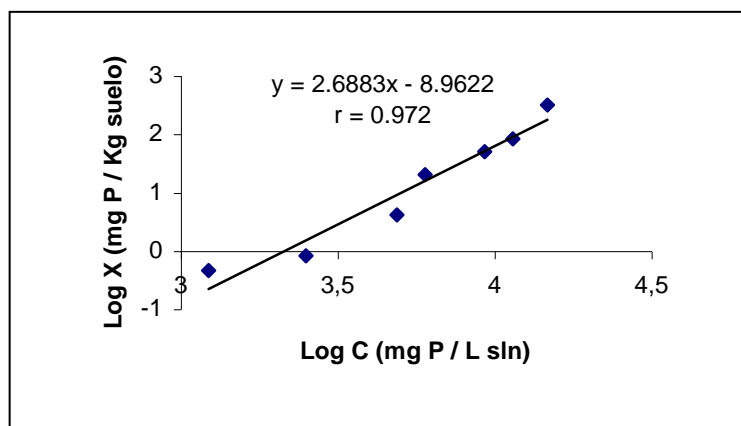
Tabla 17. Fraccionamiento de P suelo 2 fortificado con KH_2PO_4

Fraccionamiento de Fósforo	Fortificado con 616.29 ppm P	Fortificado con 3697.77 ppm P
P soluble	13,58	27,78
	13,58	28,39
	14,81	28,39
promedio	13.99	28.19
P-Al superficial	10,49	19,75
	10,49	19,13
	9,87	19,13
promedio	10.28	19.34
P-Fe superficial	203,08	386,71
	204,32	387,65
	204,32	386,71
promedio	203.90	387.02
P-Fe-Al ocluido	526.74	995,88
	526.74	995,88
	518.51	1004,11
promedio	524.00	998.62
P-Fe-Al más ocluido	67,28	124,69
	67,28	125,3
	66,67	125,3
promedio	67.08	125.10
P-Ca	14,81	24,07
	13,58	22,84
	13,58	24,07
promedio	13.99	23.66
P-orgánico	325,84	1905,74
	325,33	1890,23
	333,96	1889,41
promedio	328.38	1895.13
P-total (promedio)	1161.62	3477.06

Tabla 18. Fraccionamiento de P suelo 2, fortificado con el fertilizante triple 15

Fraccionamiento de Fósforo	Fortificado con 1333.79 ppm P	Fortificado con 3555.53 ppm P
P soluble	40,74	50,61
	40,12	50
	40,12	50
promedio	40.32	50.20
P-Al superficial	11,72	15,43
	14,2	14,81
	14,2	14,81
promedio	13.37	15.01
P-Fe superficial	386,7	479,01
	386,7	478,39
	385,8	478,39
promedio	386.4	478.60
P-Fe-Al ocluido	888,88	1152,26
	880,65	1144,03
	880,65	1144,03
promedio	883.39	1146.77
P-Fe-Al más ocluido	105,55	155,56
	103,7	154,32
	104,32	154,32
promedio	104.52	154.73
P-Ca	21,6	28,39
	14	27,78
	14	27,78
promedio	16.53	27.98
P-orgánico	415,09	1814,15
	431,6	1811,49
	432,18	1818,63
promedio	426.29	1814.76
P-total (promedio)	1870.82	3688.05

Figura 1. Isotherma de Freundlich, suelo 1 fortificado con KH_2PO_4



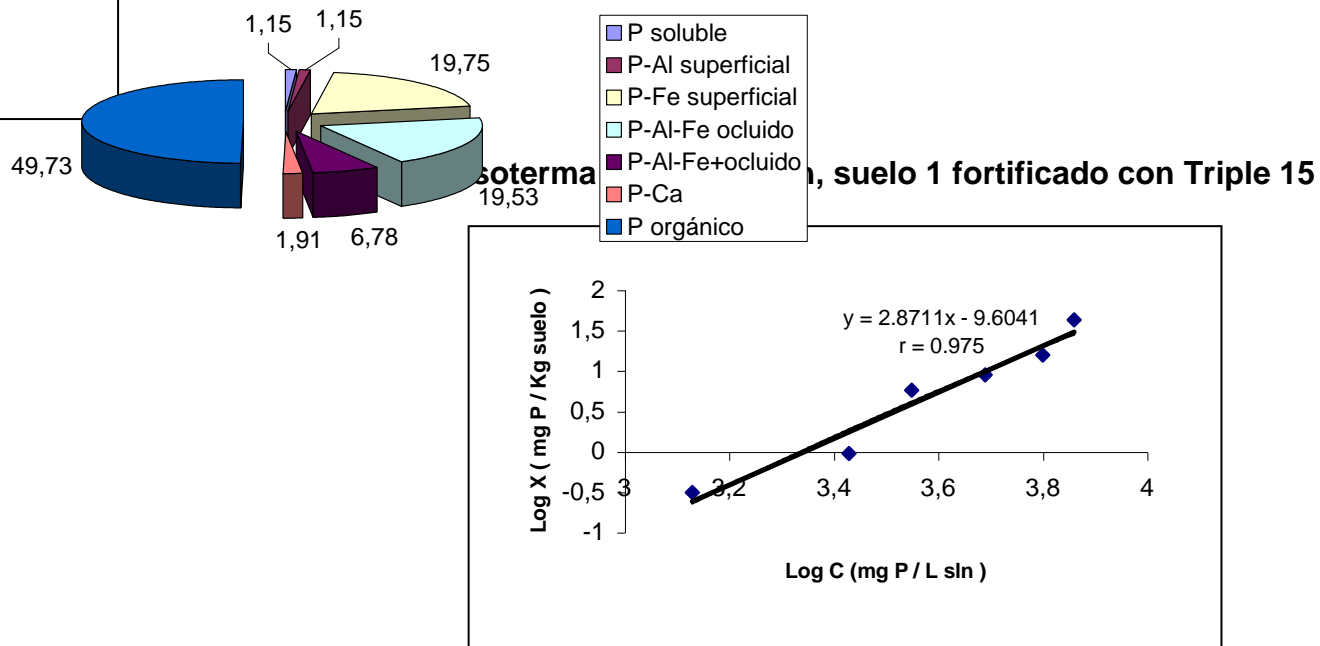


Figura 3. Isoterma de Freundlich, suelo 2 fortificado con KH_2PO_4

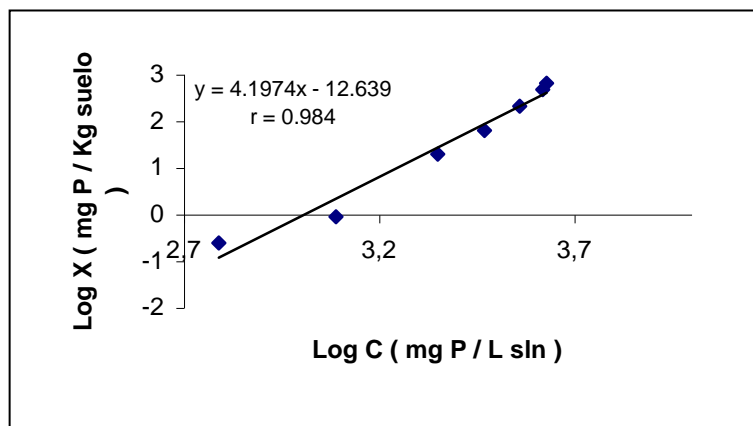


Figura 4. Isoterma de Freundlich, suelo 2 fortificado con Triple 15

