

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE QUIMICA



"ADSORCION DE FOSFATOS EN SUELOS
DEL TROPICO HUMEDO EN LA
LOCALIDAD DE YURIMAGUAS
LORETO-PERU"

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

LICENCIADO EN QUIMICA

PRESENTADO POR:

CARLOS L. ALVARADO VALLES

LIMA - PERU

1995

I. TABLA DE CONTENIDOS.

AGRADECIMIENTOS.

DEDICATORIA.

DESIGNACION DEL JURADO.

I. TABLA DE CONTENIDOS.

Lista de figuras.

Lista de cuadros.

Lista de gráficos.

II. RESUMEN.**III. INTRODUCCION.****IV. INVESTIGACION BIBLIOGRAFICA**

IV.1. Teoría de cambio de iones.

IV.1.1. Modelos para representar los cambiadores de iones.

IV.2. Cambio de cationes.

IV.3. Algunas propiedades generales de las reacciones de cambio cationico en el suelo.

IV.3.1. Poder cambiador de diferentes cationes.

IV.3.2. Reacciones de fijación de cationes cambiables.

IV.4. Retención de aniones.

IV.5. Adsorción.

IV.5.1. Leyes de adsorción.

IV.5.1.1. La isoterma de Freundlich.

IV.5.1.2. La ecuación de Brunauer, Emmet y Teller (BET).

IV.5.1.3. La isoterma de Langmuir.

IV.5.2. Uso de la isoterma de Langmuir en la química de suelos.

IV.6. Retención de fósforo.

IV.6.1. Estimaciones de la capacidad de retención de fósforo.

IV.6.2. Capacidad de canje de fosfatos en los suelos.

IV.6.3. Curvas de retención de fósforo.

IV.6.4. Métodos para la evaluación de requerimientos de fósforo.

V. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

V.1. Materiales y métodos.

V.1.1. Procedimiento para obtener isothermas de adsorción y calcular la capacidad máxima de adsorción.

V.1.2. Determinación de parámetros

Determinación de pH.

Determinación de Acidez y Calcio.

Determinación de Fósforo y Hierro.

Determinación de Carbono Orgánico.

Determinación de la Textura del Suelo.

VI. RESULTADOS.

VII. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.

VIII. CONCLUSIONES.

IX. RECOMENDACIONES.

X. BIBLIOGRAFIA.

XI. APENDICES.

XI.1. Glosario.

XI.2. Figuras.

XI.3. Cuadros.

XI.4. Gráficos.

LISTA DE FIGURAS

- III.1. Transformaciones del Fósforo en el suelo
- IV.1. Enfoque tipo "Condensador eléctrico", según Helmholtz.
- IV.2. Capa doble difusa, según Gouy y Chapman.
- IV.3. Diferentes tipos de adsorción sobre una partícula de suelo.
- IV.4. Tipos de isotermas de adsorción.
- IV.5. Isotermas de Langmuir para seis suelos de origen volcánico de México.
- IV.6. Representación generalizada de la respuesta de un cultivo en un suelo con alta capacidad de retención de fósforo.
- IV.7. Cantidad de fosfato removido por unidad de suelo en función de la concentración de la solución después de diferentes tiempos de reacción.

LISTA DE CUADROS

1. Descripción de los tratamientos en el experimento de diferentes alternativas tecnológicas.
2. Resultados del análisis de suelos para el tratamiento de altos insumos.
3. Resultados del análisis de suelos para el tratamiento de bajos insumos.
4. Resultados del análisis de suelos para el tratamiento de multiestratos.
5. Resultados del análisis de suelos para el bosque.
6. Contenido de arcilla de los suelos en estudio.
7. Valores de capacidad máxima de adsorción para los suelos de los tratamientos en estudio.
8. Coeficientes de correlación respecto a la capacidad máxima de adsorción.
9. Requerimiento de P, P_2O_5 y Roca fosfórica para el tratamiento de altos insumos (Densidad aparente: 1,45 g/cc), profundidad de incorporación: 15 cm.
10. Requerimiento de P, P_2O_5 y Roca fosfórica para el tratamiento de bajos insumos (Densidad aparente: 1,30 g/cc), profundidad de incorporación: 10 cm.
11. Requerimiento de P, P_2O_5 y Roca fosfórica para el tratamiento de multiestratos (Densidad aparente: 1,35 g/cc), profundidad de incorporación: 10 cm.
12. Requerimiento de P, P_2O_5 y Roca fosfórica para el bosque (Densidad aparente: 1,10 g/cc), profundidad de incorporación: 10 cm.
13. Requerimiento de P, P_2O_5 y Roca fosfórica en promedio para suelos ultisoles del trópico húmedo.
14. Cuadro de resultados experimentales por tratamiento y por fecha de muestreo.
15. Ecuaciones de las isotermas de adsorción por fecha de muestreo, tratamiento y cambio textural.

LISTA DE GRAFICOS

1. Curvas de Adsorción
 - Muestreo N°1: 03/09/85
 - Muestreo N°2: 09/09/85
 - Muestreo N°3: 05/12/85
 - Muestreo N°4: 11/03/86
 - Muestreo N°5: 04/09/86
 - Muestreo N°6: 05/03/87
 - Muestreo N°7: 07/09/87
 - Muestreo N°8: 01/09/89
 - Muestreo N°9: 04/09/89
 - Muestreo N°10: 05/09/90
 - Muestreo N°11: 14/09/91
 - Muestreo N°12: 15/12/92
2. Isotermas de Adsorción
 - Muestreo N°1: 03/09/85
 - Muestreo N°2: 09/09/85
 - Muestreo N°3: 05/12/85
 - Muestreo N°4: 11/03/86
 - Muestreo N°5: 04/09/86
 - Muestreo N°6: 05/03/87
 - Muestreo N°7: 07/09/87
 - Muestreo N°8: 01/09/89
 - Muestreo N°9: 04/09/89
 - Muestreo N°10: 05/09/90
 - Muestreo N°11: 14/09/91
 - Muestreo N°12: 15/12/92
3. Variación de la capacidad máxima de adsorción por tratamiento y por repetición.
4. Comparación de la variación temporal de la capacidad máxima de adsorción de los tratamientos respecto al bosque.

5. Gráficos de correlación (1).
6. Gráficos de correlación (2).

II. RESUMEN.

Los suelos representativos de los trópicos húmedos son deficientes en fósforo y cuando son usados intensivamente los niveles decaen a límites críticos, lo cual hace disminuir la productividad de estos suelos.

El estudio sobre la adsorción de fosfatos en suelos ultisoles del trópico húmedo se realizó en un campo experimental que viene siendo usado con un experimento a largo plazo que se conduce desde el año 1985 y en el cual se están comparando diferentes sistemas de producción (agricultura migratoria, altos insumos, bajos insumos, multiestratos, pijuayo y, bosque) en suelos con un rango de textura entre 10% y 12% de arcilla a los que llamaremos arena franca y con 17% de arcilla al que llamaremos franco arenoso.

En la primera fase del estudio se hicieron los experimentos de adsorción según el método propuesto por Fox y Kamprath (9). Se construyeron las curvas de adsorción, las isotermas de adsorción y se calcularon los valores de capacidad máxima de adsorción y la constante de energía de adsorción.

En la segunda fase se hizo la determinación de pH, acidez, saturación de aluminio, contenido de hierro, fósforo, carbono orgánico, calcio y contenido de arcilla y se buscaron las correlaciones de estos valores con los de la capacidad máxima de adsorción.

La adsorción de fosfatos es un indicador de la capacidad de fijación de los suelos para este anión y se encontró que es dependiente, básicamente, del contenido de aluminio y hierro presentes en el suelo.

Se encontró buena correlación entre la capacidad de adsorción y el contenido de arcilla, contenido de hierro y aluminio. También se encontró una correlación significativa entre el pH del suelo y la capacidad de adsorción, ya que a medida que el pH aumenta disminuye la capacidad de adsorción y viceversa.

Al comparar la variación temporal de la capacidad máxima de adsorción por cambio textural, se encuentra que ésta es mínima. En cambio, al comparar la variación temporal de la capacidad máxima de adsorción de los tratamientos (con diferentes sistemas de uso de la tierra) respecto al bosque, se encuentran variaciones significativas. La variabilidad del sistema de altos insumos con respecto al bosque es alta, en cambio, con el sistema de bajos insumos no es tan variable. El sistema de multiestratos, a pesar de que no recibe ningún insumo externo presenta una variabilidad muy alta debido probablemente a la gran diversidad de productos con diferentes características radiculares y de producción de biomasa.

Los valores más altos de capacidad de adsorción se encuentran para los suelos con mayor contenido de arcilla. El valor mínimo fue de 0,083 mg P ads/g suelo y el máximo fue de 0,136 mg P ads/g suelo, lo cual indica que estos suelos adsorben muy poco fosfato.

III.INTRODUCCION.

Se consigue la alta productividad de los ecosistemas de bosque tropical en suelos infértiles con un eficiente reciclaje de nutrientes y pérdidas relativas muy pequeñas de estos últimos. Los procesos de reciclaje en los campos de cultivo y en el bosque son similares. Sin embargo, existen diferencias en la pérdida de nutrientes. Además de las pérdidas por lixiviación, erosión y emisión en forma de gases que probablemente son similares para ambos (campos de cultivo y bosque), los campos de cultivo pierden nutrientes a través del producto cosechado, factor que no existe en el sistema natural (bosque).

Hasta la actualidad, la mayoría de las investigaciones en reciclaje de nutrientes se han enfocado en el ciclo y cantidades de nitrógeno. El uso de leguminosas arbóreas que fijan nitrógeno en la mayoría de los campos de cultivo es una fuente que puede parcialmente, y en algunos casos completamente, cubrir las pérdidas de éste elemento a través de los productos de la cosecha. El ciclo y las cantidades de otros nutrientes ha recibido muy poca atención.

Dentro de estos otros nutrientes, el fósforo es de particular importancia si se considera la extensión de suelos fijadores de este nutriente localizados en los trópicos y la alta proporción del mismo extraído por las plantas que pierden los suelos en la cosecha.

Se ha demostrado que los granos (arroz, frijol, soya, maíz, etc.) acumulan cantidades mayores de fósforo que las hojas, tallos y raíces. Este nutriente acumulado en los granos, merma las reservas del mismo en el suelo, agotándolo y disminuyendo la productividad. Si se hace una agricultura con cultivos continuos, será necesario añadir fósforo para mantener los suelos en producción.(2)

En los trópicos, los cultivos crecen por un año o dos y entonces son reemplazados por árboles como un barbecho natural. Durante el período de barbecho los nutrientes son transferidos del suelo a la vegetación donde se almacenan. De esta forma, los nutrientes pasan a ser una fuente de fertilizantes que permanece en las cenizas después de la tumba y quema de la vegetación (22).

De la comparación entre un barbecho natural y barbecho de especies leguminosas, se encontró que las leguminosas almacenan en la vegetación cantidades que varían de 15 a 35 Kg/ha después de 29 meses de crecimiento. Durante este tiempo disminuyó el fósforo disponible en el suelo.

Las reservas de fósforo en el suelo son agotadas y la productividad de los campos decrece más rápidamente a medida que se incrementa la frecuencia de los cultivos, por lo cual, es necesario añadir fósforo para mantener los campos en producción.

La alta cantidad de fósforo perdido (por los suelos) en los productos de cosecha y los bajos niveles de fósforo disponibles en suelos tropicales ácidos, hacen de este nutriente un factor limitante de importancia. La mayoría de los campos en suelos del trópico húmedo permanecen productivos debido a las altas aplicaciones de fertilizante fosfatado (22).

Las dosis bajas de fósforo aplicado tienen solamente un impacto pequeño en el fósforo disponible en la solución del suelo debido a que el fósforo reacciona con los componentes del mismo, los cuales lo hacen menos disponible (fijación). A medida que las dosis de aplicación se incrementan, más y más fósforo permanece en la solución del suelo de donde puede ser absorbido inmediatamente por la planta.

Se requieren dosis substancialmente más altas de fósforo para incrementar la disponibilidad de este elemento en suelos que tienen una alta capacidad para reaccionar con el fertilizante fosfatado. Factores como la baja concentración de fósforo en el suelo, alto contenido de arcilla, alto contenido de carbonato de calcio y alto contenido de óxidos de hierro y aluminio tienden a que los suelos reaccionen más activamente con el fósforo, fijándolo o haciéndolo menos disponible.

Los ultisoles son generalmente deficientes en fósforo. A menos que se agregue fertilizante fosfatado, no es posible mantener altos rendimientos de productos alimenticios.

El principal objetivo de analizar el contenido de fósforo en el suelo es el de determinar la cantidad de fósforo a aplicarse para prevenir una pérdida económica en el rendimiento del cultivo debido a la deficiencia de este elemento. El análisis del suelo provee un índice del fósforo disponible en el suelo para las plantas, índice que además es utilizado para predecir la cantidad suplementaria de fósforo a aplicarse. Un segundo objetivo del análisis de fósforo es el de monitorear la cantidad disponible de este nutriente presente en el suelo a través del tiempo. Esta última información es valiosa para la evaluación de las prácticas de fertilización en los sistemas agrícolas.

El fósforo está presente en el suelo en una variedad de formas químicas. Cada una de estas formas contribuye de manera distinta a enriquecer el total de fósforo disponible para el cultivo. La cantidad de fósforo disponible no es un valor único para un suelo determinado ya que varía de acuerdo a las condiciones ambientales que influyen en el comportamiento del suelo y la planta. Por esta razón, el predecir la cantidad de fósforo disponible en el suelo no es fácil. Sin embargo, existen varios procedimientos de extracción que se correlacionan bien con la absorción del fósforo por la planta.

Las transformaciones del fósforo aplicado al suelo ocurren dentro del esquema general que se describe en la figura III.1. El fósforo en la solución del suelo está presente en concentraciones muy bajas, pero esta es la fuente de donde las plantas absorben fósforo para su nutrición. Por esta razón es importante conocer las interacciones entre las otras formas de fósforo en el suelo y el fósforo presente en la solución.

La pérdida del fósforo soluble de la solución del suelo es un proceso continuo que comprende mecanismos como la adsorción en la superficie de los coloides y la precipitación como compuestos insolubles.

La relación entre la fijación de fósforo y el encalado de suelos ácidos altamente meteorizados (ultisoles - suelos tropicales) no es tan directa como sucede en los suelos dominados por esmectitas (arcillas de tipo 2:1). En el caso de suelos tropicales la fijación de fósforo se reduce muy poco con el incremento de pH.

Los suelos tropicales húmedos, por su extensión, son considerados potencialmente como reserva mundial para campos de producción agrícola, por lo que la investigación de las propiedades físicas, químicas y biológicas de estos suelos se hace importante.

Uno de los nutrientes más importantes, por su actividad fisiológica en las plantas y por su costo, es el fósforo, es por esto que el estudio de la adsorción de fosfatos (así se adiciona como fertilizante) es de mucha importancia por su relación con la acidez, contenido de fierro y la cantidad de aluminio presentes en estos suelos.

Son escasos los trabajos realizados sobre este tema en el país, por lo cual la presente intenta dar una aproximación sobre el fenómeno de la adsorción de fosfatos en suelos tropicales.

El presente trabajo trata de encontrar la variación temporal de la Capacidad Máxima de Adsorción de un ultisol en un campo experimental que viene siendo monitoreado desde el año 1985; que consta de seis tratamientos (cultivos) y tres repeticiones diferentes (la descripción se hace en el cuadro 1), asimismo, se trata de encontrar la relación entre la variación temporal de la capacidad máxima de adsorción respecto a parámetros como son: saturación de aluminio, contenido de hierro, acidez, pH, contenido de arcilla, contenido de calcio, contenido de fósforo, y contenido de carbono orgánico.

Se espera encontrar respuestas satisfactorias al problema de la adsorción de fosfatos después de su aplicación como fertilizante.

IV. INVESTIGACION BIBLIOGRAFICA:

IV.1. TEORIA DE CAMBIO DE IONES.

La propiedad de los suelos de retener iones en forma de cambio ha necesitado algunos conceptos para aclarar este importante proceso.

Las fuerzas esenciales que intervienen en este proceso son de naturaleza electrostática y, en consecuencia, las partículas retenidas son iones de diferente carga. Esta retención es bastante fuerte, lo que reduce la pérdida de los iones por lavado del suelo y depende de las propiedades de los iones, tales como su carga, grado de hidratación y tamaño, así como de las propiedades del adsorbente. Se observa también un equilibrio químico entre los iones adsorbidos y su concentración en la solución del suelo.(4)

IV.1.1. Modelos para representar los cambiadores de iones.

Se sabe que en la mayoría de las condiciones, los coloides del suelo tienen carga neta negativa que, puede suponerse, se encuentra en la superficie del coloide.

Este enfoque de una capa doble está representado en la fig. IV.1 y refleja los puntos de vista de Helmholtz de mediados del siglo pasado. Es el llamado enfoque tipo "condensador eléctrico".

Un enfoque posterior representa la teoría de la capa doble difusa de Gouy y Chapman, según la cual la carga que neutraliza a la opuesta del coloide está repartida en la solución cercana al coloide, pero no en una sola capa, sino en una forma difusa de concentración decreciente hasta pasar gradualmente a la solución con equilibrio de cargas (fig. IV.2) (4).

IV.2. CAMBIO DE CATIONES.

Es el cambio entre cationes en la solución del suelo, y otros cationes en la superficie de materiales con actividad superficial, como coloides inorgánicos u orgánicos (24).

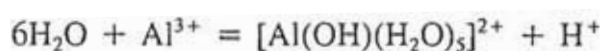
En los materiales con tamaño superior a los coloides, como la fracción de limo, la capacidad de cambio es moderada, especialmente cuando su superficie específica es alta. Este fenómeno es importante en los suelos cuyo material se caracteriza por una baja capacidad de cambio catiónico, como los suelos caoliníticos.

Es importante recordar que sólo las reacciones reversibles son consideradas como de cambio. La cuantificación del Cambio de Cationes se detalla en el apéndice I.

IV.3. ALGUNAS PROPIEDADES GENERALES DE LAS REACCIONES DE CAMBIO CATIONICO EN EL SUELO (4).

Los procesos que regulan el intercambio poseen algunas características generales, las cuales se pueden resumir como sigue:

- a). Las reacciones de cambio son reversibles, aunque la constante final del equilibrio depende a veces de la dirección desde donde se acerca el equilibrio.
- b). Las reacciones de cambio son rápidas, casi instantáneas.
- c). En general el proceso de cambio es cuantitativo, excepto cuando los cambios de pH en el proceso son pronunciados o cuando se forman iones complejos con cambio de valencia, como, por ejemplo:



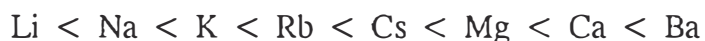
- d). El grado hasta el cual se completan las reacciones de cambio depende de:
- la concentración y naturaleza del ion añadido (ion reemplazante),
 - la concentración y naturaleza del ion que está reemplazándose o cambiándose, y
 - la concentración de los productos finales regulada por su solubilidad y grado de disociación.

IV.3.1. Poder cambiador de diferentes cationes.

Dos propiedades del catión: su valencia y su radio hidratado, revisten gran importancia. Se sabe que, en general, los iones divalentes son retenidos en mayor grado que los monovalentes y que la retención de los trivalentes es mayor aún.

Se sabe también que en los iones de carga idéntica, el poder cambiador, es decir, la retención, aumenta con el peso atómico debido a la disminución del tamaño efectivo (hidratado) del ion. El tamaño efectivo es inversamente proporcional al radio iónico.

Los conceptos anteriores permiten comprender mejor la serie liotrópica de los cationes, que puede escribirse:



y que indica que la retención aumenta del litio al bario.

Se observó que cuando la reacción de cambio no sigue la serie indicada, la reacción resultante no es de cambio, sino que tienen lugar procesos no reversibles, como los de fijación.

IV.3.2. Reacciones de fijación de cationes cambiables.

Algunos minerales de arcilla, en especial los del grupo de las micas hidratadas, pueden adsorber en forma casi irreversible iones de potasio y otros cuyo radio iónico es semejante, como el amonio.

Este fenómeno se presenta sobre todo en los iones con radios entre 1,3 y 1,5 Å° mientras que los de tamaño menor o mayor no son fijados con firmeza: los grandes por distorsionar el espacio hexagonal entre las láminas adyacentes de los silicatos y los pequeños por no estar suficientemente cerca de las cargas negativas. Cuanto mayor es la densidad de carga de las superficies de los minerales, mayor puede ser la fijación. Se ha observado que las vermiculitas son capaces de fijar potasio aun en el estado húmedo, mientras que las ilitas lo fijan especialmente cuando se altera el secado y el enmohecimiento.

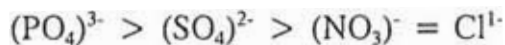
IV.4. RETENCION DE ANIONES.

Algunos suelos retienen aniones, especialmente los de pH bajos. Este fenómeno que ocurre con diferente intensidad es mucho menos conocido y estudiado que la retención de cationes. Se cree hoy día que la fuerte retención de algunos aniones por ciertos suelos, sobre todo del fosfato, no resulta de un solo proceso sino que es la suma de varios fenómenos que ocurren en secuencia. En general, las reacciones no son ni estequiométricas ni tan rápidas como las del cambio catiónico.

Algunos aniones son retenidos en muy alto grado y, en parte, irreversiblemente. Entre los aniones fuertemente adsorbidos cabe mencionar los ortofosfatos, los fluoruros, los arseniats y los citratos. Todos estos aniones forman compuestos insolubles o complejos de coordinación poco disociados con el hierro y el aluminio, cationes frecuentes en el suelo.

La adsorción de algunos otros aniones, como los cloruros y nitratos, es mucho más débil y estos son desplazados por los aniones antes mencionados. En los suelos de superficie específica grande y activa existen algunos materiales como la alófana, que los adsorbe en forma detectable. Estos mismos aniones y los otros también son intensamente retenidos cuando en los suelos predominan cargas positivas. Los principios que intervienen en este proceso han sido estudiados a fondo por Uehara y Keng (23). En suelos con alófana, se cree que los sitios positivos se deben a iones de Al^{3+} en coordinación tetraédrica y con enlaces rotos (7). En este material a un pH bajo ($\text{pH} < 5$), estas cargas se aumentan de manera considerable, en tanto que a menor acidez (osea pH más alto, $\text{pH} > 5$) son de poca importancia.

En general, aunque se tenga una serie de aniones en orden, como uno desplaza al otro, las reacciones de cambio no son estrictamente cuantitativas como sucede en el caso de los cationes. Se estima que el orden aproximado de desplazamiento en los aniones inorgánicos más frecuente es como sigue:



Se cree que tanto los procesos de adsorción como los de precipitación química y, con el paso del tiempo, la extensión de la red cristalina, son importantes en este caso y responsables de la retención de aniones.

Además de los aniones inorgánicos, los orgánicos también ocupan sitios de adsorción. De análoga importancia son tanto los aniones orgánicos relativamente pequeños, como los citratos, acetatos, etc. en los suelos, como los aniones grandes y complejos, como los humatos, fulvatos, etc.

IV.5. ADSORCION (4).

Es el fenómeno por el cual una sustancia, atraída por fuerzas electrostáticas, de Van der Waals o químicas, se "une" a la superficie de otra por un período más o menos corto. Según la naturaleza de las fuerzas que intervienen en la unión, se habla de cambio iónico cuando éstas son electrostáticas; de adsorción física cuando son de Van der Waals, y de adsorción química o quimisorción, cuando intervienen fuerzas químicas, especialmente uniones covalentes de diferentes tipos.

Las fuerzas de Van der Waals son de naturaleza electrostática y se debe a la dipolaridad de las moléculas. Se originan en la atracción de moléculas dipolares, o en la atracción entre moléculas cuya dipolaridad ha sido inducida por moléculas permanentemente dipolares, o por oscilaciones de cargas internas en moléculas sin momento dipolar medible. Son fuerzas de acción a muy corta distancia y disminuyen proporcionalmente a la 7ª potencia de la distancia.

Las fuerzas de Van der Waals son las responsables de la aglomeración de átomos o moléculas en los estados de agregación líquida o sólida.

Además de sus efectos dipolares, las fuerzas de Van der Waals pueden tener carácter multipolar y son aditivas. Así, la atracción total entre dos partículas que contienen un gran número de átomos, por ejemplo dos partículas de arcilla, es igual a la suma de las fuerzas atractivas de todos los átomos en ambas partículas. De esta suma resultan fuerzas que no son tan pequeñas. Se observa también que en las partículas grandes la disminución de las fuerzas con la distancia no es tan considerable como a nivel atómico (19). Conviene recordar que en los suelos, por ser éstos sistemas muy complejos y heterogéneos, actúan al mismo tiempo diferentes fuerzas de retención. A veces una de estas predomina y puede determinarse cuál es el proceso de retención dominante. Otras veces esta operación es muy difícil y el resultado impreciso.

En la fig. IV.3 se presentan esquemáticamente diferentes formas de adsorción.

IV.5.1. Leyes de adsorción.

Una molécula adsorbida difiere apreciablemente de otras no adsorbidas de la misma especie, no sólo por su movilidad restringida, sino porque se orienta y, de ser posible se polariza bajo el efecto del adsorbente.

Se ha observado que en condiciones constantes, por ejemplo aplicando la misma cantidad de plaguicida, la cantidad adsorbida es proporcional a la superficie disponible para la adsorción. Así, los suelos con mucha materia orgánica se caracterizan por su extensa superficie, adsorberán, y con ello inactivarán más plaguicida que otros suelos con reducida superficie.

En el caso de superficies de tamaño constante, la cantidad adsorbida dependerá, entre otras cosas, de la temperatura y en general disminuirá con el aumento de ésta, probablemente por la mayor movilidad de las partículas con más energía cinética a mayor temperatura. En consecuencia, en el caso de elevada temperatura del suelo, como ocurre en los trópicos y en las zonas templadas en verano, aumentará la desorción de sustancias del suelo. La adsorción es el resultado del equilibrio entre fuerzas de atracción que inmovilizan a las partículas y la agitación térmica que las mueve. En el grupo de fuerzas inmovilizadoras hay atracción entre superficies y partículas, como en la formación de capas múltiples. En la adsorción de líquidos, el soluto es atraído tanto por el disolvente como por el sólido adsorbente y el equilibrio entre éstos determina la adsorción neta.

En el laboratorio los fenómenos de adsorción se estudian a temperaturas constantes y con frecuencia varía la cantidad de sustancia a adsorber. Las curvas que se obtienen en estos experimentos a temperaturas constantes suelen denominarse **isotermas**.

En la fig. IV.4 se indican los cinco tipos principales de isotermas de adsorción.

La curva tipo I es cóncava (hacia abajo), lo que indica que al ser adsorbida una sustancia sobre una superficie es más difícil la adsorción adicional de la misma hasta alcanzar un valor máximo, donde las fuerzas de adsorción ya no bastan para lograr una adsorción mayor.

La curva tipo II empieza siendo cóncava, pero después cambia de sentido y en una segunda etapa se vuelve convexa y no tiene un máximo de adsorción definido.

Cuando las moléculas adsorbidas facilitan la unión de partículas adicionales las isothermas son de forma convexa, como lo ilustra el tipo indicado en III.

La isoterma de tipo IV consiste en dos etapas cóncavas unidas por una parte convexa. Podría ser interpretada como la consecuencia de dos etapas, donde las adsorciones subsiguientes limitan el proceso.

El quinto tipo (V) puede ser considerado como una combinación de III y I.

Para representar matemáticamente los fenómenos de adsorción se suele recurrir a las ecuaciones fisicoquímicas que se utilizan en sistemas más homogéneos y que son:

La isoterma de Freundlich;

La isoterma de Langmuir, y

La ecuación de Brunauer, Emmett y Teller (BET).

Estas ecuaciones se examinarán a continuación con más detalle.

IV.5.1.1. La isoterma de Freundlich.

Esta isoterma es una ecuación empírica con la cual se trata de representar matemáticamente fenómenos cuya descripción gráfica corresponde al tipo de curva I de la fig. IV.4. Se representa la cantidad de sustancia adsorbida por unidad de adsorbente (Q), por ejemplo, miligramos de fósforo por gramo de suelo en función de la cantidad aplicada de la sustancia que se adsorbe (c). Un ejemplo sería la concentración en gramos por litro de la solución saturante de fósforo.

La ecuación se escribe:

$$Q = ac^b$$

donde a y b son constantes del sistema adsorbente.

La ecuación se puede escribir también en forma logarítmica así:

$$\log Q = \log a + b \log c$$

Si se representa esta ecuación ($\log Q$ vs. $\log c$), se obtiene una línea recta con pendiente b y un intercepto en $\log a$. Se ha observado que en muchos sistemas b varía entre 1 y 0.1.

Cuando se trabaja con concentraciones bajas, la pendiente tiende a ser alta; esto indica adsorción intensa, aunque diferentes suelos pueden exhibir pendientes diferentes y reflejar con ello su capacidad de adsorción variable.

Una ventaja de ésta isoterma es que, por ser una ecuación empírica, no supone nada y así no compromete al usuario. Sin embargo, por ser una curva cóncava, indica una adsorción limitada que no corresponde a la situación real en los suelos. Por otra parte, la ecuación también indica una adsorción máxima, como se aprecia de la ecuación de Langmuir, lo cual tampoco corresponde a una propiedad real de los suelos.

IV.5.1.2. La ecuación de Brunauer, Emmett y Teller (BET).

Esta ecuación, aunque representa un poco mejor la realidad de muchos suelos, es de uso muy limitado; se la ha empleado principalmente para medir la superficie activa de los mismos. La ecuación tiene una constante más que la de Langmuir que se denomina C_0 y denota el valor de la concentración de saturación. Se puede escribir:

$$c/Q(C_0-c) = 1/qK + (K-1)/qK (c/C_0)$$

Esta forma permite también una representación gráfica de c/Q vs. c , en base a la cual pueden determinarse las constantes, ya que es una recta.

En esta ecuación de BET, como en las anteriores, Q representa la cantidad de sustancia adsorbida por unidad de adsorbente; c es la cantidad de sustancia que se adsorbe, y K es una constante. La otra constante q es la cantidad necesaria para formar una capa monomolecular completa sobre una superficie.

IV.5.1.3. La isoterma de Langmuir.

Esta isoterma, muy usada y recientemente muy discutida, se derivó de una representación simplificada de la teoría de gases. Se trata aquí de una función hiperbólica. No hace mucho, Sposito derivó una forma de la ecuación recurriendo a la mecánica estadística (25). Este autor y varios otros estiman que esta ecuación es de gran aplicabilidad en la química de suelos, aunque en ciertos casos parece ser necesario ampliarla (25, 11, 28), ya que la versión original fue derivada para sistemas más sencillos que los suelos.

En la forma original la ecuación tiene dos constantes (K y Q) y puede escribirse de la forma:

$$Q = qKc/(1+Kc)$$

donde el significado de los símbolos Q y c es el mismo que antes.

Otra segunda forma de la ecuación, que se presta más para su representación gráfica, es:

$$c/Q = 1/(Kq) + c/q$$

Se acostumbra representar c/Q en función de c , ya que los demás miembros son constantes.

Si la línea resultante de la representación gráfica es recta, se considera que la reacción sigue la isoterma de Langmuir.

Harter y Baker estiman que la ecuación se aproxima razonablemente a la realidad en lo que se refiere a máximas de adsorción (11), pero que es menos válida en lo que se refiere a energías de adsorción. Estos autores indican que la naturaleza curvilínea, comúnmente observada en los datos experimentales, se debe a que no se considera el efecto de los iones desplazados en el proceso de adsorción, como, por ejemplo, cuando lo que se adsorbe son iones de cambio como el zinc. Se ha indicado que el procedimiento de resolver la adsorción curvilínea en dos rectas no es válido porque se basa, equivocadamente, en la idea de que la adsorción sólo ocurre en los sitios de baja energía después de haberse completado la adsorción en los sitios de alta energía (12).

IV.5.2. Uso de la isoterma de Langmuir en la química de suelos.

Hace años, esta isoterma se usaba sobre todo para representar la adsorción de aniones como el fosfato y el sulfato por el suelo. Los datos han sido aprovechados para calcular la máxima capacidad de adsorción y luego comparar diferentes suelos (6, 21).

En fecha reciente, se ha empleado esta isoterma para representar la retención de cationes, en especial de elementos menores como el cinc y cobre. Además del uso de constantes en la retención de los cationes, se han usado también para estimar la fuerza de retención de estos como, por ejemplo, del zinc, y para determinar la correlación entre ese valor y otras propiedades del suelo.

La expresión matemática originalmente desarrollada por Langmuir para describir la adsorción de un gas en un líquido puro ha sido con frecuencia adoptada para interpretar reacciones entre constituyentes sólidos del suelo y soluciones conteniendo aniones tales como: cloruros, sulfatos, boratos y fosfatos (28).

La ecuación originalmente desarrollada para gases, puede describirse como:

$$n = \frac{kbP}{1 + bP}$$

Donde: n = cantidad de gas adsorbido por unidad de área.
 P = presión del gas en el equilibrio
 k = adsorción máxima y
 $b = \frac{\alpha}{\Gamma (2 MRT)^{1/2}}$

Donde: α = fracción de moléculas adheridas a la superficie; son retenidas por fuerza de la superficie.
 Γ = es la proporción del gas que se evaporaría si la superficie estuviera completamente cubierta.
 M = peso molecular del gas.
 R = constante universal de los gases.
 T = temperatura absoluta.

Además, Langmuir indicó que la ecuación podía arreglarse de la manera siguiente:

$$P/n = 1/bk + P/k$$

Entonces, si P/n es graficada como una función de P , la pendiente es igual a $1/k$. Si P es reemplazada por C , representando la concentración de adsorbato en la solución y por otro lado reemplazando n por x/m que representa la cantidad de fósforo adsorbido por unidad de peso de suelo, se obtiene la ecuación frecuentemente utilizada en química de suelos (11):

$$C/(x/m) = 1/kb + C/b$$

Donde: $C =$ Concentración de fósforo en la solución en equilibrio.
 $x/m =$ Cantidad de fósforo adsorbido por unidad de peso del suelo.
 $b =$ La adsorción máxima de fósforo.
 $k =$ Constante de energía de enlace del fósforo sobre el suelo.

Esta ecuación fue primero usada para describir la retención de fósforo en suelos por Olsen y Watanabe (20), a partir de entonces ha sido ampliamente usada para este propósito. Una ventaja para su uso es que puede ser transformada a la forma lineal y puede hacerse uso de la regresión lineal para estimar los coeficientes. Estos autores concluyen que la ventaja más grande de la ecuación de Langmuir es que la adsorción máxima puede calcularse y servir como un índice de la capacidad de retención del suelo.

Fassbender (6) describe detalladamente como se determinan en el laboratorio los datos de la curva y como se procesan para encontrar el valor de capacidad máxima de retención según Langmuir. Ejemplos de estas isotermas se encuentran en la fig. IV.5. Los valores de retención máxima proveen un índice de la capacidad de retención de fósforo. En general, los suelos que no "retienen fósforo" producen valores de 0.1-0.3 mg P/g suelo; suelos con alta capacidad de retención, valores de 1 a 2 mg P/ g suelo y en casos de suelos en que los mecanismos de retención son extremadamente pronunciados se registran valores superiores a 2 mg P/ g de suelo y hasta 4.0 mg.

La ecuación original tiene la desventaja de que no considera las partículas que podrían desplazarse en el proceso de adsorción, como en el caso del cambio iónico. Algunos autores (11) creen que a este tipo de reacción se debe la naturaleza curvilínea, con dos componentes, de la adsorción.

En los últimos años, varios autores, y entre ellos Sposito, no recomiendan que se utilice la forma original de la ecuación y proponen, en cambio, el empleo de constantes adicionales, lo que hace que la ecuación represente mejor las condiciones del suelo (25).

IV.6. RETENCION DE FÓSFORO

Se entiende por retención de fósforo al fenómeno que se presenta cuando, a causa de diversos tipos de interacciones con componentes del suelo, una forma soluble del fósforo queda retenida en la fase sólida y por lo tanto no puede ser absorbida por las raíces de las plantas. El término "retención" es preferido en la literatura reciente en lugar de los términos "fijación" o "adsorción" comúnmente usados.

La aplicación de fertilizantes fosfatados en un suelo con alta capacidad de retención de fósforo puede producir curvas de respuesta como la de la fig. IV.6, en las cuales sólo se produce un incremento pronunciado en el rendimiento cuando se adiciona una cantidad de fertilizante capaz de satisfacer la capacidad de retención del suelo, permitiendo así que nuevas adiciones del fertilizante enriquezcan la solución del suelo y el cultivo pueda absorberlo.

Los mecanismos responsables de la retención de fósforo son muy diversos; generalmente se distinguen varios de ellos actuando en cada suelo simultáneamente. Sample et. al (23) clasifican estos mecanismos como: adsorción física, adsorción química, intercambio aniónico, precipitación superficial y precipitación de fases sólidas separadas.

IV.6.1. Estimaciones de la capacidad de retención de fósforo.

En estas estimaciones se trata una serie de muestras con soluciones de fosfato de concentración conocida y después de determinado tiempo se separa la solución y se mide la concentración de fosfato en ella. Un procedimiento simplificado hace uso de una sola muestra de suelo. Parte del fosfato presente en la solución pasa a formar parte de la fase sólida del suelo debido a los procesos arriba mencionados.

En las determinaciones de laboratorio, la proporción de fósforo que queda retenida en el suelo depende de varios factores además de la composición del suelo que modifican los mecanismos de retención siendo los principales: la temperatura, las características de las soluciones de fosfato (pH, fuerza iónica, concentración de fosfato) y el tiempo de reacción.

IV.6.2. Capacidad de canje de fosfatos de los suelos.

De los aniones nutrientes de las plantas únicamente los fosfatos presentan un intenso canje de aniones en los suelos. Los sulfatos también se canjean algo, pero los cloruros y nitratos se canjean poco o nada. Por ello es necesario pensar que el canje de aniones tiene un carácter general diferente del cambio catiónico, que se presenta mas o menos igualmente para todos los cationes comunes. El "canje", "adsorción" o "precipitación" de los fosfatos implica un paso de los iones fosfato a la fase sólida y cuando se examina el cambio de fase con detalle, toda distinción que se intente entre el significado de los tres términos aplicados al sistema de fosfatos del suelo es difícil y probablemente inútil. La fracción de fosfatos fijos que puede intervenir en los procesos de "canje" puede calcularse a partir de la superficie específica (tamaño de partículas) de la fase fosfato. Las cantidades de fosfato presentes sobre las superficies pueden determinarse mediante el canje de fósforo.

IV.6.3. Curvas de retención de fósforo.

La fig. IV.7 muestra una de las formas comunes de representación de los resultados de una determinación de retención de fósforo en el laboratorio. Esto es, la cantidad de fosfato removido por unidad de suelo (x) en función de la concentración de la solución en equilibrio con el suelo. La misma figura muestra el efecto del tiempo de reacción.

Las líneas de la fig. IV.7 generalmente se denominan "curvas de retención", "curvas de fijación" o "curvas de adsorción de fósforo" y existen diferentes ecuaciones matemáticas que se usan para describirlas. Las más conocidas son las de Langmuir con diversas modificaciones y la de Freundlich. Una alternativa de representación de los datos de retención es trabajar con una curva "a mano libre", esto es sin el uso de ecuaciones, y la retención de fósforo se caracteriza entonces determinando el valor del fosfato absorbido a alguna concentración dada (9).

IV.6.4. Métodos para la evaluación de requerimientos de fosfatos.

Muchos test químicos han sido planeados a través de los años para medir las cantidades de fósforo disponible para las plantas. Cuando son usados apropiadamente, muchos de estos test son útiles en la separación de suelos que son aptos a la respuesta de adición de fertilizante fosfatado de aquellos que no son apropiados para esto. Estos test, sin embargo, no proveen información acerca de la cantidad de fertilizante fosfatado requerido. Fox y Kamprath (9), por eso, consideraron un factor de capacidad, el cual es una medida de la cantidad de fosfato requerido para dar un nivel de mantenimiento de fósforo en solución. Ellos propusieron el uso de isotermas de adsorción para estimar los requerimientos de fósforo por los suelos. La aproximación es usada para determinar cuánto fosfato debe adicionarse al suelo para obtener el nivel de fósforo en la solución del suelo que mantenga un óptimo crecimiento de las plantas (18).

El estudio de los aniones en el suelo se ve dificultado por la carencia de una metodología adecuada, y por la complejidad del fenómeno.

Los fosfatos no escapan a esta realidad, la que se ve dificultada por la poca atención que se le dió en el pasado. El presente trabajo da un avance para cubrir este vacío.

V. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL:

Se trató de cuantificar la capacidad máxima de adsorción de los suelos del Trópico Húmedo Peruano. Para el estudio de adsorción se usaron muestras de suelos a una profundidad de 15 centímetros de un campo experimental a largo plazo en el que se está monitoreando la dinámica de nutrientes con diferentes opciones tecnológicas desde el año 1985. El ensayo comprende seis tratamientos (Agricultura Migratoria, Altos Insumos, Bajos Insumos, Multiestratos, Producción de Pijuayo y, Bosque Secundario), con tres repeticiones (de textura arena franca, franco arenoso y, arena franca) de condiciones ecológicas idénticas, los cuales son descritos en el cuadro 1, en cada uno de los cuales se hicieron los estudios. Hasta el año 1992 se hicieron doce muestreos de suelos de los diferentes tratamientos de este experimento (26).

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos en el experimento de diferentes alternativas tecnológicas.

	Tratamiento	Descripción
1	Agricultura Migratoria	Corte y quema manual, arroz, yuca y plátano y barbecho sin insumos.
2	Altos Insumos	Desmonte mecanizado, rotación de maíz-soya ó maíz-maní. Encalado y fertilización (N, P, K).
3	Bajos Insumos	Corte y quema, rotación de arroz-caupí y purma de kudzu. Bajas aplicaciones de P con roca fosfórica.
4	Multiestratos	Corte y quema, siembra inicial de cultivos (arroz-caupí) y finalmente se deja con árboles (Inga, Arazá, Cedro, Pijuayo, Café) y cobertura (Centrocema Macrocarpun).
5	Producción Pijuayo	Corte y quema, siembra inicial de cultivos y después se deja con árboles de Pijuayo para producción de fruto a 5x5 m y con una cobertura de Centrocema macrocarpun.
6	Bosque Secundario	Actualmente tiene 18 años el bosque secundario.

V.1. MATERIALES Y METODOS:

El estudio de adsorción se hizo usando el método de Fox y Kamprath cuya descripción se hace más adelante.

La cuantificación del contenido de fósforo disponible en el suelo se hizo usando el método de Olsen modificado, el cual es usado rutinariamente en el Laboratorio de Suelos de la Estación Experimental "San Ramón" - Yurimaguas. Después se evaluó la adsorción de fosfatos usando la isoterma de Langmuir.

La determinación de parámetros (químicos y físicos) se describen a continuación.

V.1.1. Procedimiento para obtener isotermas de adsorción y calcular la capacidad máxima de adsorción.

Se describe el procedimiento de Fox y Kamprath (9) aplicado al cálculo de isotermas de Langmuir.

1. Pesar 3 gramos de suelo tamizado por malla 60 (2 mm), por duplicado, en series de 10 tubos de centrífuga.
2. Adicionar 30 ml de CaCl_2 0.01M conteniendo además cantidades de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ correspondientes a 0.0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0 y 35.0 ppm de fósforo.
3. Adicionar 2 gotas de tolueno a cada tubo para evitar la actividad microbiana.
4. Colocar las muestras horizontalmente en baño maría a 25°C y agitar en dos períodos por día por espacio de 30 minutos cada uno, con movimiento recíprocante, durante 6 días.
5. Centrifugar y determinar fósforo en el sobrenadante por colorimetría.
6. Calcular el fósforo adsorbido considerando que todo el fósforo que desaparece de la solución está adsorbido en el suelo.

7. Ajustar los datos a la forma rectilínea de la ecuación de Langmuir y calcular la capacidad máxima de adsorción.

$$C/q = (1/Kb) + (1/b)C$$

b = capacidad máxima de adsorción (mg P/g de suelo).

K = constante relacionada con la energía de adsorción (litro/mg P).

C = concentración de la solución en equilibrio.

q = cantidad de fósforo adsorbido por peso de suelo (mg P/g de suelo).

V.1.2. Determinación de parámetros.

- Determinación de pH (suelos - agua 1:2,5).

Materiales y equipos.

pH-metro.

Soluciones amortiguadoras de pH conocido (4; 7; y, 10).

Taras de 10 ml de capacidad.

Sistemas agitador, dispensador.

Frasco para agitación de 60 ml de capacidad.

Procedimiento.

Se toma 10 ml de muestra y se transfiere al frasco de agitación de 60 ml.

Se agrega 25 ml de agua desionizada con el dispensador.

Se coloca las muestras en el agitador y se somete a 400 rpm durante 5 minutos.

Se deja reposar por 20 minutos y luego se vuelve a agitar por 2 minutos adicionales.

Una vez calibrado el pH-metro con las soluciones amortiguadoras, se mide el pH de las muestras, previa agitación enérgica de la suspensión. los resultados se obtienen por lectura directa.

- Determinación de Acidez y Calcio.**Materiales y equipos.**

Taras de 2.5 ml de capacidad.

Sistemas agitador, dispensador y dilutor-dispensador.

Frasco para agitación, filtración y titulación de 60 ml de capacidad.

Agitadores magnéticos.

Buretas.

Papel filtro Whatman N°1

Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

Reactivos.

Solución extractante de KCl 1N.

Solución de NaOH 0.010N.

ftalato de Potasio.

Solución indicadora de fenolftaleína al 0.1%.

Solución de Lantano al 1%. Solución patrón de Calcio de 100 ppm.

Procedimiento.**Obtención del extracto del suelo.**

Se toma 2.5 ml de la muestra del suelo en un frasco de agitación y se adiciona 25 ml del extractante KCl, se somete a agitación por 10 minutos a 400 rpm.

Se filtra usando papel Whatman N°1.

Determinación de la Acidez.

Usando el dilutor-dispensador se toma 10 ml del extracto y, se adiciona 15 ml de agua desionizada.

Se agrega de 3 a 4 gotas del indicador y se procede a titular con NaOH 0.01N en agitación constante.

Se hace un blanco y se resta del gasto de cada muestra.

Determinación de Calcio.

Usando el dilutor-dispensador se toma una alícuota de 1 ml del extracto, 9 ml de agua desionizada y 15 ml de la solución de Lantano al 1%.

En esta dilución se determina la concentración de Calcio por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Determinación de Fósforo y Hierro.**Materiales y equipos.**

Taras de 2.5 ml de capacidad.

Sistemas agitador, dispensador y dilutor-dispensador.

Frasco para agitación, filtración y titulación de 60 ml de capacidad.

Papel filtro Whatman N°5

Espectrofotómetro UV-Visible.

Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

Reactivos.

Solución extractante Olsen modificado: (NaHCO_3 0.5N, EDTA 0.01M, Superfloc 127)

Solución "A" (Reactivo concentrado para reacción de color del Fósforo): Tartrato de Antimonio y Potasio, Acido Sulfúrico y Molibdato de Amonio.

Solución "B": 150 ml de Solución "A" + 1 gramo de ácido Ascórbico y diluido a 1 litro.

Solución patrón de Fe de 1000 ppm.

Obtención del extracto del suelo.

Se toma 2.5 ml de la muestra del suelo en un frasco de agitación y se adiciona 25 ml del extractante Olsen modificado, se somete a agitación por 10 minutos a 400 rpm.

Se filtra usando papel Whatman N°5.

En este filtrado se harán las determinaciones de Fósforo y Hierro.

Determinación de Fósforo.

Usando el dilutor-dispensador se toma una alícuota de 2 ml del extracto en bicarbonato, 8 ml de agua destilada y 10 ml del reactivo "B".

Después de 40 minutos se lee la absorbancia o el porcentaje de transmitancia en el espectrofotómetro UV-Visible a 670 nm.

Determinación de Hierro.

La concentración de Hierro se determina por lectura directa del extracto en bicarbonato en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

Determinación de Carbono Orgánico (Método de Nelson & Sommers).**Materiales y equipos.**

Block de digestión para tubos, con termostato y cronómetro (0 a 400 °C y 0 a 4 horas).

Agitador y barra magnética.

Tubos de prueba de 1"x6" de 50 ml de capacidad.

Buretas de 25 ml de 0.1 ml de resolución.

Balanza analítica de 0.001 g de sensibilidad.

Tamiz de malla N° 60.

Reactivos.

Acido Sulfúrico concentrado

Solución de dicromato de potasio 1N

Solución indicadora de o-fenantrolina.

Sulfato ferroso amoniacal.

Procedimiento.

Se pesa entre 0.25 a 0.50 g de suelo tamizado por malla N° 60 y se trasvasa a los tubos de prueba.

Se adiciona 5.00 ml de solución de dicromato y luego 7.5 ml de ácido sulfúrico concentrado.

Se prepara, por separado, cuatro blancos que sólo contienen reactivos. Se colocan los tubos con las muestras tratadas y dos de los blancos en el bloque de digestión previamente calentado a 150 °C y se mantienen por 30 minutos.

Se retira el bloque y se deja enfriar a temperatura ambiente.

Se agrega tres gotas de indicador a cada tubo.

Se titula las muestras y los cuatro blancos directamente en el tubo con el sulfato ferroso amoniacal hasta el cambio de color del indicador, usando luz blanca de fondo y el agitador magnético.

- **Determinación de la Textura del Suelo.**

Materiales y equipos.

Agitador eléctrico, dispersante.

Vaso de dispersión.

Probeta de sedimentación.

Higrómetro de Bouyoucos.

Reactivos.

Hexametáfosfato de Sodio al 10%.

Procedimiento.

Se coloca en el vaso de dispersión 50 gramos de muestra y se llena el recipiente hasta la mitad con agua destilada.

Se adiciona 50 ml de la solución dispersante (Hexametáfosfato de Sodio).

Se coloca el recipiente en el agitador por 5 minutos.

Luego, se transfiere a la probeta de sedimentación, arrastrando con agua destilada todo el suelo. Se enrasa con agua a 1 litro.

Se agita la suspensión vigoramente por un minuto.

Se coloca la probeta de sedimentación sobre la mesa y se toma el tiempo.

A los 20 segundos, se inserta el higrómetro y se toma la primera lectura a los 40 segundos exáctamente. Se anota la lectura y se toma la temperatura de suspensión.

De igual manera se toma la segunda lectura a las 6 horas. Se anota también la temperatura.

Se hace un control, adicionando sólo reactivo dispersante y se trabaja como a cualquier muestra. Cada vez, se resta la lectura del control de la lectura de la suspensión para el efecto de los calculos.

VI. RESULTADOS

Cuadro 2. Resultados del análisis de suelos para el tratamiento de ALTOS INSUMOS.

TEXT.	MUEST. Nº	PH	C Org. g/Kg	P mg/L	Acidez cmol (+)/L	Ca cmol (+)/L	Fe mg/L	Sat. Al %
A R E N A F R A N C.	1	4.9	9.80	10.79	0.50	0.88	340	31.0
	2	4.9	9.92	10.96	0.50	0.70	340	32.6
	3			11.31	1.00	0.80	390	45.2
	4	5.0	11.55	24.01	0.50	1.55	403	18.5
	5	5.2	10.62	23.84	0.20	1.47	370	8.3
	6	4.6	7.23	8.00	1.10	0.50	482	64.3
	7	5.8	10.62	30.28	0.10	1.92	277	3.1
	9	6.0	10.03	28.01		2.14	132	
	10	6.0	9.33	40.02		2.19	278	
	11	5.7		2.61		2.18	280	
	12	5.6	8.63	52.20		2.20	327	
	F R A N C O A R E N.	1	4.5	8.28	5.57	0.90	0.39	480
2		4.5	10.85	11.31	1.70	0.53	517	64.8
3		4.6	11.55	14.96	1.20	1.49	491	33.4
4		4.5	10.73	16.18	1.80	1.20	520	47.6
5		4.7	13.30	17.40	1.00	1.87	497	25.0
7		5.1	11.90	24.36	0.30	2.39	482	6.9
8					0.20	2.72		4.3
9		5.4	11.66	26.10		2.73	435	
10		4.6	10.73	9.57	1.10	0.74	498	52.6
11		5.1	10.73	16.01	0.20	2.46	424	4.7
12		4.6	9.33	15.66		1.15	498	
A R E N A F R A N C A		1	4.3	9.57	8.18	2.30	0.35	527
	2	4.7	8.98	12.18	0.70	0.49	456	44.5
	3	4.8	9.80	12.01	0.80	0.66	465	42.7
	4	5.0	10.97	15.83	0.20	1.22	407	10.1
	5	5.2	12.13	16.53	0.10	1.34	379	4.7
	6	5.2	10.27	20.01		1.40	347	
	7	5.6	9.45	22.27		1.72	342	
	8			5.39		1.72	206	
	9	6.0	8.87	10.27		1.77	130	
	10	5.9	8.40	7.66		1.66	155	
	11			21.05		1.44	281	
	12	5.0	8.40	9.57		1.32	227	

Cuadro 3. Resultados del análisis de suelos para el tratamiento de BAJOS INSUMOS.

TEXT.	MUEST. Nº	PH	C Org. g/Kg	P mg/L	Acidez cmol (+)/L	Ca cmol (+)/L	Fe mg/L	Sat. Al %
A	1	4.7	11.31	12.35	0.60	0.92	436	32.6
R	2	4.6	10.38	12.18	0.60	0.58	454	41.6
E	4	4.8	11.55	6.26	0.40	0.87	363	25.3
N	5	4.8	10.85	12.88	0.60	0.90	478	33.3
A	6	4.9	11.20	10.44	0.10	0.98	383	7.2
	7	4.6	13.65	13.05	0.50	0.86	496	31.0
F	8			9.22	0.70	0.70	444	42.9
R	9	4.7	10.62	3.13	0.90	0.70	385	49.7
A	10	4.7	11.20	9.22	0.90	0.75	482	48.3
N	11			6.26	0.80	0.59	459	52.6
C.	12	4.7	9.68	9.74	0.60	0.59	450	42.8
F	1	4.5	10.27	9.92	2.50	0.79	540	67.2
R	3			8.70	1.10	1.24	509	37.4
A	4	4.6	10.03	10.79	2.10	0.98	504	58.1
N	5	4.6	9.68	6.79	2.00	0.91	524	59.0
C	6	4.6	9.10	8.70	2.20	0.84	521	62.6
O	7	4.5	8.75	7.83	1.90	0.95	524	58.2
	8				1.20	1.22		41.9
A	9	4.5	10.62	8.18	2.00	0.90	529	60.6
R	10	4.5	9.33	5.92	2.30	0.69	536	70.1
E	11			6.09	2.10	0.70	543	68.4
N.	12	4.7	9.68	7.48	1.20	1.23	501	40.2
A	1			9.57	1.10	0.46	502	62.5
R	2	4.6	9.68	14.79	0.70	0.62	486	41.6
E	3	5.0	10.27	11.31	0.20	1.13	432	11.3
N	4	5.0	10.73	17.40	0.20	1.04	439	12.2
A	5	4.8	9.45	13.22	0.20	1.00	451	13.2
	6	4.9	10.97	16.01	0.10	1.49	440	5.1
F	7	4.9	11.31	12.01	0.20	1.09	467	12.5
R	8			12.18	0.10	1.23	428	6.2
A	9	4.9	9.68	8.70	0.10	1.20	439	6.3
N	10	4.9	10.62	11.14	0.10	0.98	444	7.6
C	11	4.7	11.31	10.09	0.20	0.70	438	18.5
A	12	4.7	9.92	8.87	0.30	0.51	465	30.0

Cuadro 4. Resultados del análisis de suelos para el tratamiento de MULTIESTRATOS.

TEXT.	MUEST. Nº	PH	C Org. g/Kg	P mg/L	Acidez cmol(+)/L	Ca cmol(+)/L	Fe mg/L	Sat. Al %
A R E N A F R A N C A	1	5.0	12.95	17.40	0.20	1.11	462	12.1
	2	4.9	11.90	17.75	0.30	0.80	438	20.9
	3	4.9		13.92	0.40	0.81	449	28.3
	4	5.0	11.90	18.97	0.30	0.79	433	20.5
	5	5.1	11.55	16.53	0.10	1.30	404	5.8
	6	5.2	11.55	16.01		1.58	382	
	7	5.1	12.25	14.96	0.10	1.00	482	7.3
	8		12.83	14.09	0.20	0.99	426	13.7
	9	5.0	14.23	13.05		1.32	414	
	10	4.8	12.01	7.31	0.30	0.68	430	25.8
	11			8.70	0.40	0.77	417	29.8
	12	5.1	11.31	10.44	0.10	0.91	442	8.1
F R A N C O A R E N.	1	4.6	7.47	7.66	0.40	0.46	463	37.3
	2	4.6	10.15	8.00	1.50	0.33	545	64.1
	3	4.7	11.66	8.70	1.30	1.25	530	41.6
	4	4.7	9.64	11.14	0.90	1.23	536	33.3
	5	4.8	10.47	10.44	0.90	1.21	503	34.0
	6	4.8	11.42	8.18	1.10	0.95	548	43.8
	7	4.7	11.90	1.91	0.70	1.15	306	29.9
	8			6.44	0.90	0.75	349	44.7
	9	4.6	10.59	4.00	1.20	0.92	410	46.6
	10	4.6	10.11	7.48	1.40	0.71	484	58.3
	11	4.5	10.35	3.65	1.40	0.69	481	59.5
	12	4.5	9.16	6.61	1.10	0.61	455	56.4
A R E N A F R A N C.	1	4.6	8.92	5.92	1.10	0.77	464	50.0
	2	4.9	6.78	9.05	0.20	0.61	339	17.0
	3	5.0		8.87	0.10	1.15	305	6.0
	4	4.9	7.61	9.92	0.10	0.95	346	7.3
	5	4.8	7.38	8.70	0.10	0.81	309	8.5
	6	5.1	8.21	7.31		1.17	284	
	7	4.9	6.78	7.83	0.20	0.63	342	19.6
	8		8.33	4.00	0.10	0.66	290	10.0
	9	4.7	7.97	5.92	0.20	0.68	338	19.0
	10	4.7	7.97	7.83	0.20	0.60	364	20.2
	12	4.8	6.78	5.74	0.20	0.48	365	23.2

Cuadro 5. Resultados del análisis de suelos para el tratamiento de BOSQUE.

TEXT.	MUEST. Nº	PH	C Org. g/Kg	P mg/L	Acidez cmol(+)/L	Ca cmol(+)/L	Fe mg/L	Sat. Al %
A	1	4.7	10.47	10.44	0.50	0.98	415	29.0
R	3	4.5	9.99	11.48	1.00	0.51	398	59.8
E	4	4.5	9.52	11.31	0.80	0.70	405	47.0
N	5	4.5	9.75	8.53	0.70	0.45	404	51.0
A	6	4.4	9.87	10.96	0.80	0.50	384	53.6
	7	4.5	8.45	9.05	0.60	0.43	368	50.8
F	8	4.3	11.54	12.53	0.80	0.31	419	62.0
R	9	4.4	10.47	8.00	1.20	0.21	434	77.4
A	10	4.4	10.47	10.79	1.00	0.40	481	64.5
N	11			7.83	0.90	0.51	424	56.6
C.	12	4.7	9.52	9.05	0.50	0.62	383	37.0
F	1	4.6	9.87	8.53	1.90	1.11	510	55.2
R	4	4.5	9.75	5.22	1.90	0.94	472	59.5
A	5	4.5	10.94	6.09	2.10	0.76	490	63.0
N	6	4.6	14.16	10.61	2.30	0.62	442	71.2
C.	7	4.5	11.90	9.05	1.20	0.67	512	54.5
	9	4.6	11.66	6.09	1.50	0.87	523	54.5
A	10	4.4	10.71	7.83	2.80	0.52	704	77.5
R	11			6.79	1.70	0.61	521	66.4
E.	12	4.6	11.30	7.83	1.40	0.57	431	61.4
A	1	5.0	9.87	12.01	0.70	0.58	408	46.3
R	3	4.6	9.52	10.27	0.70	0.39	433	56.0
E	4	4.5	10.83	10.44	0.80	0.36	432	60.6
N	5	4.6	10.23	8.00	0.70	0.39	386	57.3
A	6	4.7	9.99	13.75	1.40	0.68	381	57.6
	7	4.6	9.75	11.31	0.60	0.44	439	50.0
F	8			10.79	0.80	0.31	465	62.9
R	9	4.6	11.30	12.01	0.70	0.39	468	56.9
A	10	4.6	9.75	8.53	1.20	0.25	508	76.9
N	11	4.6	9.99	10.44	0.20	0.33	441	29.4
C.	12	4.8	9.87	8.70	0.50	0.97	352	25.6

Cuadro 6. Contenido de arcilla (en %) de los suelos en estudio.

Repetición	Tratamiento			
	Altos Insumos	Bajos Insumos	Multiestratos	Bosque
arena franca	10	11	8	12
franco arenoso	17	16	17	18
arena franca	13	12	11	13

Cuadro 7. Valores de capacidad máxima de adsorción (mg P ads/g suelo) para los suelos de los tratamientos en estudio.

Muestreo	Altos Insumos		Bajos Insumos	
	franco arenoso	arena franca	franco arenoso	arena franca
1	0.104	0.049	0.111	0.055
2	0.084	0.054	0.092	0.045
3	0.088	0.068	0.084	0.035
4	0.107	0.037	0.107	0.030
5	0.087	0.031	0.114	0.045
6	0.103	0.078	0.132	0.032
7	0.108	0.032	0.127	0.055
8	0.102	0.034	0.112	0.062
9	0.111	0.017	0.124	0.075
10	0.113	0.041	0.136	0.082
11	0.108	0.016	0.110	0.052
12	0.012	0.009	0.105	0.050

Muestreo	Multiestratos		Bosque	
	franco arenoso	arena franca	franco arenoso	arena franca
1	0.088	0.032	0.103	0.034
2	0.088	0.032	-----	-----
3	0.087	0.031	0.095	0.043
4	0.086	0.026	0.111	0.046
5	0.083	0.050	0.113	0.051
6	0.111	0.023	0.120	0.043
7	0.095	0.069	0.110	0.056
8	0.083	0.041	0.118	0.062
9	0.124	0.045	0.127	0.073
10	0.121	0.068	0.124	0.078
11	0.011	0.042	0.120	0.063
12	0.092	0.052	0.087	0.060

Cuadro 8. Coeficientes de correlación respecto a la Capacidad Máxima de Adsorción.

Variable	Arcilla	Acidez	Contenido de Hierro	Saturación de Aluminio	pH
Capacidad Máxima de Adsorción	0.76	0.73	0.64	0.60	-0.51

Variable	Contenido de Fósforo	Energía de Adsorción	Contenido de Calcio	Carbono Orgánico
Capacidad Máxima de Adsorción	-0.39	0.28	-0.12	0.09

VII. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS:

En el cuadro 7 se muestran los valores de capacidad máxima de adsorción en función de los muestreos de suelo y se observa que los valores más altos se obtienen en los suelos de textura franco arenosos (17% de arcilla, en promedio), debido a que, en este, son mayores la cantidad de hierro, la acidez y la saturación de aluminio con respecto a los suelos de textura arena franca (12% de arcilla, en promedio). Esta mayor adsorción de fosfatos en estos suelos se debe a la formación de complejos fosfato-hierro y fosfato-aluminio, en la superficie de las arcillas (6).

En el cuadro 8 se muestran los valores de correlación entre la capacidad máxima de adsorción y el contenido de arcilla, la acidez, contenido de hierro, la saturación de aluminio y el pH del suelo.

El mayor coeficiente de correlación, como era de suponer, se da para el contenido de arcilla (0.76), seguido de la acidez (0.73). Con hierro y con la saturación de aluminio el coeficiente de correlación baja un décimo y con el pH baja dos décimos con respecto al coeficiente de correlación de las arcillas. Todos estos coeficientes de correlación son significativos al 5% de probabilidades.

El pH es menor en los suelos de textura franco arenosos (pH=4.52, en promedio) que en los suelos de textura arena franca (pH=4.89, en promedio), en estas condiciones de pH se favorece la presencia de iones H_2PO_4^- . A valores bajos de pH se facilita la precipitación de fosfatos alumínicos y fosfatos ferrosos, además las arcillas (suelos franco arenosos) presentan mayor capacidad de cambio de iones; por estas razones los suelos franco arenosos presentan mayor capacidad de adsorción que los suelos de textura arena franca. Esta mayor capacidad de adsorción se ve favorecida por la mayor saturación de aluminio y la mayor concentración de hierro en los suelos franco arenosos con respecto a los suelos de textura arena franca.

Puede decirse que en las condiciones de estos suelos a mayor saturación de aluminio mayor será la cantidad de fosfato adsorbido.

Al aumentar la concentración de fosfatos en la solución aumenta la cantidad de fosfato adsorbido, lo cual sugiere que es un fenómeno dependiente de la concentración.

Se logra la máxima adsorción de fosfatos a niveles de concentración determinados, que dependen de la naturaleza del suelo, sobre los cuales, cualquier adición ulterior es innecesaria porque el suelo no adsorbe más fosfato. Se logra, por el contrario, perturbar el equilibrio de adsorción y se precipitan fosfatos de hierro y aluminio porque la concentración de iones fosfato lo permite, este fenómeno puede confundirse con una falsa adsorción. Esto se puede descartar observando la curva de adsorción, donde se muestra la variación progresiva de la adsorción y en el momento que ocurre la precipitación se observa un salto o discontinuidad de la propiedad en estudio.

La buena correlación de la adsorción con el contenido de hierro (0.64) y con la saturación de aluminio (0.60) sugiere la importancia de estos elementos (Fe y Al) en el fenómeno de adsorción de fosfatos. Esto se hace evidente por la alta correlación de la adsorción con la acidez, que es una propiedad fundamentalmente dependiente del contenido de aluminio.

En el sistema de altos insumos tanto en el suelo franco arenoso como en el suelo de textura arena franca, la variación de la capacidad de adsorción en el tiempo es muy fluctuante debido a que se fertiliza continuamente con superfosfato triple de acuerdo a las necesidades de los cultivos. Algunas veces no es necesario aplicar fosfato debido al efecto residual del fertilizante, entonces la capacidad de adsorción también cambiará. En este sistema se mantienen cultivos anuales en forma uniforme pero lo que crea la variabilidad para que se den cambios en la capacidad de adsorción son las diferentes dosis de fosfato y otros fertilizantes aplicados continuamente.

En el sistema de bajos insumos la fluctuación de la capacidad de adsorción en función del tiempo es menos variable debido a que no se fertiliza y se mantienen cultivos anuales en forma uniforme.

En el sistema de multiestratos a pesar de que no se fertiliza y todo crece en base a reciclaje de nutrientes se dan fluctuaciones en la capacidad de adsorción debido a la variabilidad de cultivos y especies perennes. Estas presentan diferentes sistemas radiculares y la capacidad de absorber los nutrientes, incluido el fósforo, también es diferente. La exportación del fósforo en los diferentes productos que se cosechan también es muy variable. Esto se nota claramente cuando se comparan todos los sistemas con el bosque secundario, ver apéndices; cuadros y gráficos.

VIII. CONCLUSIONES

1. Si solamente se consideraría la capacidad del suelo para reaccionar con el fósforo, el fertilizante se debería mezclar lo menos posible con el suelo. Esto resultaría en una mínima cantidad de reacciones de fijación y en una máxima cantidad de fósforo en la solución del suelo. Sin embargo, las concentraciones altas de fósforo en la solución del suelo mejoran la absorción de este elemento hasta cierto punto.
2. Inicialmente la absorción se incrementa rápidamente con el incremento de la concentración de fósforo en la solución del suelo, pero gradualmente se acerca a un máximo de absorción donde se estabiliza.
3. Aún cuando la adsorción es la primera reacción de fijación, la precipitación de fósforo como fosfatos de hierro y aluminio es la principal causa de fijación de fósforo en estos suelos. El fósforo adsorbido sobre la superficie de los óxidos sirve como punto de nucleación para la precipitación de los fosfatos de hierro y aluminio.
4. Los iones fosfato tienen alta afinidad con el aluminio, hierro y calcio con los cuales forman compuestos que se precipitan en forma insoluble. Estos procesos dependen entonces de la presencia de estos metales en la solución del suelo. En suelos ultisoles, el incremento en acidez conduce a la ruptura de la estructura de los cristales y a la liberación de aluminio que puede fácilmente combinarse con los iones fosfato y formar compuestos insolubles. Es por esta razón que en este tipo de suelos el incremento de pH por encalado permite la precipitación de aluminio y en consecuencia mejora la disponibilidad de fósforo en la solución del suelo.
5. En suelos tropicales (Ultisoles) que han sufrido procesos severos de meteorización, las arcillas dominantes (óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio) son estables hasta valores de pH tan bajos como 5,0. En esta forma el aluminio se encuentra fijado en una partícula de arcilla y solamente a valores de pH muy bajos ingresa a la solución del suelo y puede reaccionar con los fosfatos para formar compuestos insolubles. En estos suelos la principal forma de pérdida de fósforo es la adsorción de los fosfatos a la superficie muy reactiva de los coloides.

6. La velocidad de reacción aumenta con la temperatura, lo que indica que el factor responsable es más la formación de enlaces químicos que la manifestación de enlaces físicos (la adsorción ordinaria). El cambio de fase parece estar controlado por la formación de enlaces químicos con los iones Fe^{3+} y Al^{3+} que se encuentran en las superficies de los minerales o en disolución. Se sabe que todos estos cationes forman fosfatos salinos insolubles y el "canje" tiene la misma naturaleza que una reacción de doble descomposición. La medida de la capacidad de canje de fosfatos (capacidad de adsorción de fosfatos) depende de condiciones tales como el tiempo, el pH de referencia y el tratamiento previo del campo.
7. La retención de fosfatos tiene que ver con la disponibilidad de este nutriente para las plantas y con su distribución a través del perfil del suelo, del sistema radicular de las especies presentes en el suelo y en última instancia su importancia radica en la economía de fertilizantes por cuanto un suelo capaz de retener a los fosfatos significa que éste lo guardará para suministrarlo a las plantas cuando lo necesiten y no se pierdan en las aguas de drenaje.(17)
8. El tiempo de incubación de 6 días asegura el establecimiento del equilibrio. El CaCl_2 se emplea para mantener la fuerza iónica en las soluciones y permite obtener extractos claros que faciliten su análisis, el pH obtenido en el equilibrio se aproxima a las condiciones de campo además que el calcio es un elemento que se encuentra en la mayoría de las tierras agrícolas. Las concentraciones de fósforo de las soluciones adicionadas pueden variar según la capacidad de retención de fósforo del suelo.
9. La adsorción de fosfatos es un fenómeno en que al parecer no sólo ocurre lo que se denomina adsorción en el coloide del suelo, sino también otras reacciones como absorción o penetración, precipitación y otras no precisadas todavía.

IX. RECOMENDACIONES.

1. Las aplicaciones de fósforo en este tipo de suelos se harán como P_2O_5 ó como P, que pueden provenir de roca fosfórica, superfosfato simple o superfosfato triple, teniendo en cuenta la textura, densidad aparente y tratamiento del suelo, previa aplicación de cal.
2. Para el tratamiento de altos insumos, que consiste en mecanización agrícola, encalado y fertilización (N, P, K), la aplicación de fósforo se hace incorporando el fertilizante a 15 centímetros de profundidad, este tipo de tratamiento presenta un suelo con mayor densidad aparente que los otros debido a que sufre compactación por efecto de la mecanización.
3. La aplicación de fósforo para el tratamiento de bajos insumos (pocas dosis de fertilizantes) se hace superficialmente (al voleo) y la incorporación en forma manual, con rastrillos, a aproximadamente 10 centímetros de profundidad.
4. Los sistemas de multiestratos y bosque no reciben fertilización alguna, por lo que los datos presentados son sólo referenciales, se considera para estos sistemas una incorporación a 10 centímetros de profundidad.
5. Se recomienda usar roca fosfórica de Bayovar (33% P_2O_5 y 14,9% de P) debido a su bajo costo y a su mayor disponibilidad de fósforo comparado con el superfosfato y también a que es altamente reactiva bajo condiciones de suelos ácidos ($pH < 5$).

X. BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Aguilar, S. A. y Cajuste, L. J. 1987. Retención de Fósforo. En: Análisis Químico para evaluar la fertilidad del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Publicación especial N^o1.
- 2.- Alegre, J. C. y Sánchez, P. 1991. Manejo de suelos con cultivos continuos en los trópicos húmedos del Perú. En: Manejo de suelos tropicales en Latinoamérica. pag. 157-168.
- 3.- Beek, J. and W. H. Riemsdijk. 1982. Interaction of ortophosphate ions with Soil. In: G. H. Bolt (Ed.) Soil Chemistry B. physico chemical models. Elsevier, New York. N.Y.
- 4.- Bornemisza, E. Introducción a la química de suelos. 1982. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico. Washington, D.C.
- 5.- Cajuste, L. J. 1979. Adsorción de fósforo en algunos suelos de origen volcánico de México y su relación con ciertos componentes del suelo. Agrociencia N^o36. Chapingo, México.
- 6.- Fassbender, H. W. 1966. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnia Latinoamericana. 3:203-216.
- 7.- Fields, M. y Schofield, R. K. 1960. Mechanism of Ion Adsorption by Inorganic Colloids, New Zeland J. Sci., 3:563-579.
- 8.- Fixen, P. 1993. Informaciones Agronómicas. Enero.
- 9.- Fox, R. L. and E. J., kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requeriments of soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34:902- 907.
- 10.- Goldberg, Sabine and Sposito, Garrison. 1985. On the mechanism of specific phosphate adsorption by hydroxilated mineral surfaces: A review. Commun. In Soil Sci. Plant anal., 16(8), 801-821.
- 11.- Harter, R. D. y Baker, D. E. 1977. Applications and Misapplications of the Langmuir Equation to Soil Adsorption, Soil Sci. Soc. Am. J., 41(6) 1077-1080.
- 12.- Holdorf, I. C. R. 1978. Soil Adsorption Phenomena and the Langmuir Equation, Soil Sci. Soc. Am. J., 42(6) 986-987.
- 13.- Informaciones Agronómicas N^o14, Enero, 1994, Instituto de la Potasa y el Fósforo. Fósforo en el suelo: Propiedades y dinámica.
- 14.- Jackson, M. L. 1964. Análisis Químico de Suelos. Edit. Omega. Barcelona. pag. 249.
- 15.- Kafkafi, U., A. M. Posner, and J. P. Quirk. 1967. Desorption of Phosphate from Kaolinite. Soil Science Society of America Proceedings, 31(3) 348-353.
- 16.- Kuo, S. and E. G. Lotse. 1972. Kinetics of Phosphate Adsorption by Calcium Carbonate and Ca-

