

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

FACULTAD DE AGRONOMIA

CARACTERIZACION DE LA CAPACIDAD DE FIJACION

DE FOSFORO DE DISTINTOS SUELOS DEL URUGUAY

Tesis para optar al título
de Ingeniero Agrónomo

~~Jorge Escudero~~
~~Alejandro Moron~~

Jorge L. ESCUDERO FIDANZA

Alejandro MORON YACOEL

Montevideo - URUGUAY

octubre 1978

7 NOV. 1978

Manuel Raffelt

José V. Vaz

AGRADECIMIENTOS

- Agradecemos en primer lugar, al Director de la presente Tesis, Prof. Adj. de la Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Ing. Agr. José Pedro Zamalvide. Fue su permanente orientación y estímulo en cada una de las etapas de este trabajo, lo que hizo posible su realización.
- A los técnicos de la Dirección de Suelos y Fertilizantes (M.A.P), por su asesoramiento en la selección y ubicación de los suelos estudiados.
- A la Sra. Ing. Agr. Ester Gula de González, Jefe del Laboratorio de Análisis de Suelos de la Dirección de Suelos y Fertilizantes (M.A.P.), por la realización de numerosos análisis.
- Al Sr. Perito Agropecuario, Wilfredo Ariel Ibáñez, por la programación de la computadora Olivetti prog. 101, así como por su asesoramiento en el manejo de la misma.
- Al Sr. Abraham Kaplán, por su asesoramiento en materia de clasificación de suelos.
- Al personal docente y no docente de la Cátedra de Suelos de la Facultad de Agronomía.

INDICE

	<u>Página</u>
INTRODUCCION.....	1
<u>Capítulo 1.</u> REVISION BIBLIOGRAFICA.....	4
1.1. Mecanismos de fijación de P.....	4
1.2. Métodos de caracterización de la fijación de P.....	15
1.3. Modelos e Indices Propuestos para describir la fijación.....	22
1.3.1. Ecuación de Freundlich.....	23
1.3.2. Ecuación de Langmuir.....	24
1.3.3. Indices de fijación.....	28
1.4. Algunos resultados obtenidos en el estudio de la fijación.....	31
1.4.1. Relaciones de la fijación con características de los suelos..	31
1.4.2. Etapas en la fijación de fós foro.....	43
<u>Capítulo 2.</u> MATERIALES Y METODOS.....	46
<u>Capítulo 3.</u> RESULTADOS Y DISCUSION....	50
3.1. Isotermas de adsorción.....	50
3.2. Indices de fijación propuestos...	51
3.3. Influencia del tiempo de equili brio sobre los índices de fija ción.....	54
3.4. Correlaciones entre Indices de fijación y propiedades del suelo.	55

3.5. Inferencia de la capacidad de fijación.....	63
3.5.1. Agrupamiento de los suelos según capacidad de fijación, evaluada a través del Índice I.....	63
3.5.2. Criterios para inferir la capacidad de fijación del P de los suelos.....	64
CONCLUSIONES.....	67
FIGURAS Y CUADROS.....	69
APENDICE.....	91
BIBLIOGRAFIA CITADA.....	97

INTRODUCCION

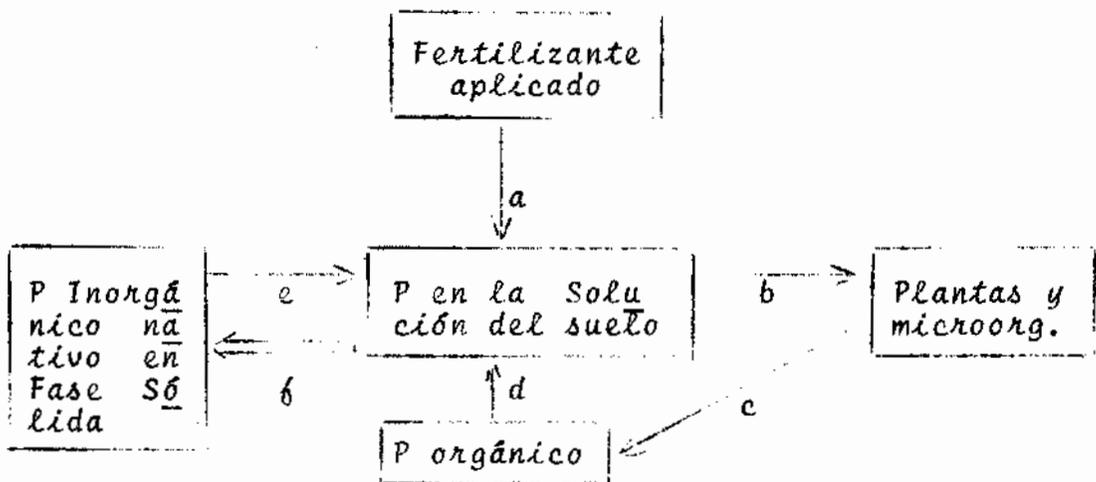
El fósforo es uno de los nutrientes esenciales para las plantas. Su importancia radica en el hecho de ser uno de los factores limitantes del rendimiento.

Las raíces de las plantas toman el P de la solución del suelo, destacándose dos características:

1) la concentración de P en la solución del suelo normalmente es inferior a lo necesario, tornándose en factor limitante en el proceso de absorción por la planta.

2) Dada una concentración, limitante o no, la cantidad de P en la solución del suelo en un momento dado es varias veces inferior a la cantidad que absorbe un cultivo en un solo período de crecimiento.

El ciclo del P en el suelo es producto de un conjunto de procesos que puede ser esquematizado, en forma simplificada, como sigue:



- a) Disolución del fertilizante b) Absorción por las plantas y microorganismos
- c) Deposición de materia orgánica
- d) Mineralización del P orgánico
- e) Disolución del P inorgánico nativo
- f) Fijación de P en la fase sólida

De acuerdo a esto, el P del suelo se puede dividir en dos grandes grupos: orgánico e inorgánico

El P orgánico es un porcentaje importante del P total, a pesar de lo cual en el corto plazo, tiene poca importancia dado que el proceso de mineralización no es seguido de un proceso de difusión y absorción por la planta, sino que en gran parte el P mineralizado reacciona con el suelo.

Dentro del P inorgánico se diferencian:

- compuestos químicos bien definidos y cristalizados, de poca importancia en la nutrición de las plantas por no encontrarse en equilibrio con el P de la solución del suelo.
- compuestos químicos mal cristalizados o amorfos. Por un lado mantienen cierto equilibrio con los compuestos cristalizados, y por otro con el P de solución del suelo.
- adsorbido por los coloides del suelo. Este también en equilibrio con el P de la solución del suelo.
- presente en la solución del suelo.

Entre parte del P presente en fase sólida y el P en solución se establece un equilibrio, como ya fue dicho. Este equilibrio está desplazado fuertemente hacia la fase sólida en todos los suelos, disminuyendo esto la eficiencia de los fertilizantes fosfatados. No obstante esto, el grado de ese desplazamiento varía en los distintos suelos.

Por lo tanto, la eficiencia de un mismo fertilizante diferirá de acuerdo a la capacidad de fijación específica de cada suelo.

O sea que al incrementarse la capacidad de fijación, disminuirá la respuesta a la fertilización fosfatada.

El conocimiento de esa capacidad de fijación, nos proporciona las herramientas para determinar que cantidad de P debe ser agregada para alcanzar una concentración dada en solución. El estudio de los mecanismos de fijación implicados, y el grado de disponibilidad del P retenido ayudarían a la comprensión del fenómeno.

Este trabajo se propone realizar un primer paso en ese trayecto.

Se tomaron 39 suelos representativos de la variación existente en R.O.U. y se trató de caracterizar cuantitativamente la fijación.

Esto se realizó mediante la construcción de Isotermas de adsorción, a partir de las cuales se definieron de terminados Indices relacionados con la fijación. De los mismos se seleccionaron dos, para correlacionarlos con propiedades del suelo.

Por último, se agruparon los suelos estudiados en tres grupos de acuerdo a su capacidad de fijación.

CAPITULO I

REVISION BIBLIOGRAFICA

1.1. MECANISMOS DE FIJACION DE P

Al comenzar el desarrollo de este tema, corresponde aclarar primero la terminología que en torno a la "fijación" de P se maneja.

En el proceso por el cual el fosfato existente en solución desaparece de ella para pasar a la fase sólida del suelo, ocurren dos fenómenos diferentes: por un lado parte del fosfato es retenido por el suelo de manera tal que es posible su posterior extracción con ácidos diluïdos. Este P se considera disponible para las plantas, pues se encuentra en un equilibrio dinámico con el fosfato que resta en la solución del suelo.

Por otro lado, otra parte del P de solución, o el mismo P retenido en forma intercambiable, va siendo paulatinamente fijado por la fase sólida en forma no intercambiable. Esta última unión del P a la fase sólida es mucho más enérgica, y esta porción del fosfato no es extraïble con ácidos diluïdos y por consiguiente no se considera disponible para las plantas.

En contemplación a estos distintos fenómenos, muchos autores distinguen entre retención y fijación. Llamam retención de P al primer proceso por el cual el mismo queda disponible, mientras que reservan el término fijación, para el proceso por el cual el fosfato pierde significación en la nutrición de las plantas.

Otra distinción que suele hacerse es entre adsorción y precipitación. Estos dos términos designan a dos mecanismos distintos por los cuales el fosfato es retenido o fijado.

En la presente sección será manejada la diferenciación entre adsorción y precipitación solamente. En el resto de este trabajo, los términos: retención, fijación, e incluso adsorción, serán empleados como sinónimos para designar un único hecho: el pasaje de fosfatos inicialmente presentes en la solución del suelo, a la fase sólida del mismo.

Sin embargo, el uso indistinto de estos términos no implica perder de vista la existencia de las diferencias anotadas.

En la solución del suelo el P inorgánico se encuentra bajo las distintas formas iónicas en que se disocia el ácido fosfórico. La forma que predomine en la solución dependerá del pH. En los pH normales de los suelos (4,0 a 8,0) las principales son H_2PO_4 y HPO_4 ; la primera se ve favorecida por pH bajos y la segunda por pH altos, mientras que, aproximadamente a un pH de 6,5 las cantidades de ambas se equilibran.

Estas son las formas bajo las cuales el P es absorbido por las plantas, y a su vez bajo las cuales el fósforo interviene en distinto tipo de reacciones.

El ión fosfato entonces, reacciona en el suelo pasando a formar distintos compuestos de P con muy variadas solubilidades. Los compuestos que se formen dependerán de las condiciones específicas de cada suelo.

Se considera que en general, la máxima disponibilidad de P para la mayor parte de los cultivos ocurre en un rango de pH que va de 5,5 a 7 (29).

Sin embargo, dentro de este rango pueden encontrarse suelos con capacidades de fijación de P altas, y por lo tanto en ellos la disponibilidad se verá reducida (ejemplo: suelos de basalto)

Grandes grupos de reacciones intervinientes

en la fijación

De acuerdo con la bibliografía consultada, podrían clasificarse los fenómenos de fijación de P, en tres grandes grupos de reacciones. Estos serían:

- a) Adsorción de fosfatos
- b) Precipitación de fosfatos
- c) Sustitución isomórfica

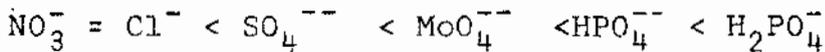
a) Adsorción de fosfatos: la adsorción de P se inscribe dentro del grupo de reacciones que dan origen al intercambio aniónico que existe en los suelos. Este llamado intercambio aniónico, no se rige por las mismas leyes del intercambio catiónico.

Es sabido que los coloides del complejo de intercambio muchas veces presentan cargas externas positivas que dan lugar al intercambio de aniones con la solución.

Bajo condiciones de acidez, pueden acumularse protones a los grupos OH^- originando cargas positivas (12). En consecuencia el incremento de acidez trae aparejada una mayor adsorción de aniones.

Otro mecanismo que origina intercambio aniónico es la sustitución o reemplazo de iones OH^- por otro anión.

Se ha podido establecer que existen diferencias en las cantidades adsorbidas de los distintos iones a un pH determinado. La siguiente secuencia de adsorción aniónica es citada por Fassbender (12):



De esto se desprende que la adsorción de fosfatos, que es la que nos ocupa, sería la de mayor relevancia.

* La temperatura y el tiempo de contacto entre la solución y el suelo tienen influencia sobre la adsorción. Low y Black (citados por Kardos, 1960), encontraron que al aumentar la temperatura se incrementaba la adsorción. Esto llevó a estos investigadores a concluir que era una adsorción de tipo químico y no físico.

Con respecto al tiempo, Fassbender encontró que poniendo un suelo en contacto con una solución de P, el mismo continuaba adsorbiendo fósforo aún luego de 188 horas. Llamaba la atención que no se alcanzara la sa

turación del complejo adsorbente, pero lo que sucede es que además de la adsorción ocurren otro tipo de reacciones como la precipitación de fosfatos de Al, Fe, y Ca.

- b) Precipitación de fosfatos: los iones fosfato que se incorporan a la solución del suelo a partir de un fertilizante, reaccionan con mayor o menor prontitud con cationes existentes en la solución tales como Al^{+++} , Fe^{+++} , y Ca^{++} . Estas reacciones son exergónicas, y dan lugar a la formación de productos que constituyen fuentes secundarias de P para las plantas.

Dos categorías de reacciones pueden formarse: por un lado las reacciones en las que intervienen Al^{3+} ó Fe^{3+} , que son esencialmente muy similares, y por otro lado las reacciones en las que interviene el Ca^{++} .

Dentro de los materiales del suelo, los alúmino-silicatos y sesquióxidos libres son fuentes de iones aluminio (ejemplo: caolinita y gibbsita). Al disolverse en el suelo un gránulo de fosfato mono-cálcico, se forma una solución de ácido fosfórico, se incrementa la concentración de P en la solución y se sobrepasa la constante de producto de solubilidad (K_{ps}) de compuestos alúmino-fosforados. De esta forma se producen precipitados de fosfatos de aluminio cristalinos o amorfos, menos solubles. Procesos similares ocurren con el hierro.

La disponibilidad de aluminio e hierro para reaccionar con el P está gobernada por la concentración de OH^- (17). De esto surge que aumentando el pH del suelo puede disminuirse la precipitación del P. Pero si el pH aumenta como consecuencia de la presencia de compuestos de Ca como el $Ca(OH)_2$ y el $CaCO_3$, pueden ocurrir otras reacciones de precipitación. La solución ácida de H_3PO_4 que se origina con la disolución de los granos de superfosfato, es capaz de reaccionar también con iones Ca^{++} si estos están presentes, originando precipitados de P-Ca.

Pa Ho Hsu, citado por Fassbender (12), estudió la adsorción y precipitación de fosfatos llegando a la conclusión de que son procesos muy similares, que difieren en última instancia en el grado de polimerización de los hidróxidos de Al y Fe en el suelo. Ambos son consecuencia de un mismo hecho: la alta reactividad del fósforo tanto con el Fe como con el Al (bajo Kps).

X c) Sustitución Isomórfica: Kardos (1960) incluye a este como un tercer grupo de reacciones por el cual es fijado el P.

Este autor distingue 3 tipos generales de sustitución isomórfica, a saber:

- Continuación de la reacción de adsorción mediante adsorción intercrystalina.
- Transformación de la reacción de adsorción en una sustitución isomorfa de hidroxilo o aniones de silicato del enrejado cristalino.
- Descomposición del enrejado cristalino isomórficamente transformado al sobrepasar los límites de la sustitución isomorfa permisible, seguida de recristalización como nuevo compuesto mineral

De lo primero, obtuvieron evidencias MacAuliffe y otros en experiencia citada por Kardos (17).

La teoría de la sustitución del hidroxilo está respaldada por numerosas pruebas, pero existen también pruebas de que la sustitución de silicato por P puede ser importante en la fijación de fósforo. (Mattson, Ross y Hendricks; Toth; Low y Black; citados por Kardos).

Mecanismos específicos de la fijación

A continuación se hará una breve enumeración de los mecanismos específicos que actúan en la fijación de P por los suelos, y que se inscriben dentro de alguno de los 3 grupos de reacciones antes mencionadas.

- Reacción de los fosfatos con las arcillas: los io
nes fos
fatos pueden combinarse con las arcillas mediante
dos mecanismos: 1) reemplazo de un OH^-
2) formando una unión Arcilla- Ca^{++}
- fosfato.

La primera posibilidad está señalando a las arci
llas tipo 1:1 (caolinita) como arcillas de mayor
capacidad de fijación. Al tener una estructura de
este tipo, los OH de la capa octaédrica quedan más
expuestos. Por otra parte, la caolinita es el úni
co mineral arcilloso que tiene una capacidad de
intercambio aniónico detectable (10).

También se ha determinado que arcillas con baja
relación $\text{SiO}_2:\text{R}_2\text{O}_3$ pueden fijar mayores cantida
des de P que las que tienen una relación alta.

La capacidad de intercambio aniónico ha sido de
mostrada por el desplazamiento de fosfatos uni
dos a la fase sólida del suelo, mediante distin
tos aniones como el arseniato, hidroxilo y oxalato.
Pero por lo general este reemplazamiento no
es estequiométrico como en el caso de la capaci-
dad de intercambio catiónico (C.I.C.) (29). y es
mayor en las arcillas tipo 1:1.

El segundo mecanismo expuesto (puente de Ca^{++}),
consiste en que cationes bivalentes como el Ca^{++}
intercambien una valencia con el oxígeno del ex
tremo del cristal y la otra con el anión. Hay
evidencias experimentales de que arcillas satura-
das de calcio retienen mayores cantidades de P,
que aquellas saturadas con Na^+ u otros iones mo
novalentes (Regland et al 1957, citados por Tis
dale y Nelson).

Este tipo de uniones (Arcilla- Ca^{++} - H_2PO_4) puede
ocurrir a pH ligeramente inferiores a 6,5,
puesto que en suelos más básicos podría precipi
tarse fosfato dicálcico directamente de la solu
ción.

En resumen: suelos más arcillosos tienden a tener mayor capacidad de fijación. Esto equivale a decir que a mayor área de superficie expuesta, con un tipo de arcilla dado, mayor será la fijación.

Por otro lado, arcilla tipo 1:1 tienen mayor capacidad de fijación.

- Reacción del P con el Fe y el Al: como ya fue dicho, el P se combina con iones tales como el Fe y el Al, y posiblemente también con Mn, para formar compuestos insolubles. Estos compuestos resultantes pueden ser precipitados o adsorbidos en la superficie de los óxidos de Fe y Al.

Con el transcurso del tiempo, la solubilidad de los mismos va decreciendo.

- Precipitación de fosfatos de dicálcicos: el fosfato monocálcico que es agregado como fertilizante, si se encuentra en un medio donde la actividad del ión Ca^{++} es importante y el pH es alto, tiende a pasar a la forma de fosfato dicálcico que es menos soluble.

También pueden formarse otros fosfatos cálcicos básicos como la hidroxiapatita y el carbonato apatita.

Estos procesos de por sí contribuyen a reducir la solubilidad y asimilabilidad del P.

- Precipitación superficial en carbonatos de calcio: los fosfatos que entran en contacto con la fase sólida del $CaCO_3$, son precipitados en su superficie. La cantidad de precipitado dependerá de la superficie expuesta del $CaCO_3$ y de la concentración de P en solución.

Este proceso se entiende que es un fenómeno de superficie en sus etapas iniciales, mientras que el deposito subsiguiente puede ser del tipo de acción de masas (29).

Naturalmente que todos estos mecanismos de fijación no pueden actuar al mismo tiempo. Las condiciones requeridas para la existencia de algunos de ellos, son distintas que las requeridas para la existencia de los otros.

Así tenemos que suelos que evolucionan en condiciones de climas húmedos y son muy lixiviados, se enriquecen gradualmente en caolinita y óxidos de Fe y Al hidratados. Esto se representa gráficamente en la Fig. 1. Estos suelos, asociados a pH bajos, tendrán también gran cantidad de cargas electropositivas.

El enriquecimiento en caolinita y óxidos de Fe y Al trae aparejada una reducción en la C.I.C. y un incremento en la capacidad de intercambio aniónico (Fig. 2).

En resumen, los suelos ácidos tendrán una importante capacidad de fijación de P, y ésta será causada por la formación de compuestos férricos y alúmicos, así como por la reacción de los orto-fosfatos con la arcilla. Bajo ciertas condiciones los compuestos forman un precipitado y en otras condiciones son adsorbidos a las superficies de las arcillas y de los minerales del suelo.

En el otro extremo, la fijación de P en suelos alcalinos estaría determinada por tres factores (29):

- actividad del ión Ca^{++}
- cantidad y tamaño de $CaCO_3$ libre en el suelo
- cantidad de arcilla presente

Los mecanismos específicos que pueden actuar en suelos alcalinos son: precipitación de fosfato dicálcico, precipitación en la superficie de $CaCO_3$, y puentes de Ca^{++} entre los fosfatos y las arcillas.

Otros factores que influyen en la retención de P por el suelo

- a) Materia orgánica: se ha considerado generalmente que el abonar con abonos verdes o estiércol producía una mejora en la utilización del P por los cultivos subsiguientes.

Tanto Tisdale y Nelson, como Kardos, concluyen que el efecto, global de la materia orgánica (M.O.) sería el de disminuir la fijación. Esto se daría a través de distintos mecanismos:

- Al descomponerse la M.O. libera CO_2 que al disolverse en agua forma ácido carbónico. Este ácido es capaz de descomponer ciertos minerales primarios del suelo (29).

El rol de este mecanismo para la disponibilidad de P en suelos calcáreos es importante. En suelos neutros también se ha visto esto, y hay algunas evidencias de su importancia en suelos ácidos (29).

El efecto máximo del ácido carbónico en disolver P del suelo se produce en pH ligeramente ácido a alcalino.

- Otros mecanismos serían a través del humus que incrementaría la solubilidad del P. Podrían formarse complejos fosfo-húmicos que son más fácilmente asimilables por las plantas. El ión fosfato adsorbido podría ser reemplazado por el ión humato.

También el humus puede envolver partículas de sesquióxidos formando una cubierta y reduciendo la capacidad de fijación.

- Por otra parte, otros aniones orgánicos originados en la descomposición de la M.O. podrían formar complejos estables con el Fe y el Al reduciendo su reactividad. Estos iones podrían liberar P previamente fijado por el Fe y el Al.

No obstante estas conclusiones Singh y Jones (1976) estudiaron el efecto sobre la fijación de P del agregado de distintos tipos de residuos orgánicos. De acuerdo con estos autores, el efecto de la M.O. sería algo más complejo, y en el mismo tendría influencia el porcentaje de P de los residuos orgánicos. Las conclusiones de esta investigación serán discutidas más adelante.

- * b) Reacción del suelo: el efecto del pH sobre la disponibilidad de P ya ha sido discutido. En este punto se resumirán los conceptos manejados.

La disponibilidad de P es mayor en pH de 5,5 a 7.

Por debajo de 5,5 el P reacciona con Fe y Al y sus hidróxidos disminuyendo su disponibilidad. Por encima de 7 ocurren reacciones con Ca, Mg y carbonatos.

Si el suelo fuera alcalino a causa de Na y no de Ca, no habría disminución de la disponibilidad de P.

- * c) Fertilización previa: el grado de saturación de P del suelo es importante en la fijación del fertilizante añadido.

Se ha comprobado que se fija más P a medida que se incrementa la relación $R_2O_3 : P_2O_5$ en el suelo. Cuanto más chica sea esta relación quiere decir que hay una mayor cantidad de P en relación al contenido de óxidos de Fe y Al, o sea que mayor es la saturación del suelo en P.

Esto tiene implicancias prácticas evidentes.

- * d) Tiempo de reacción: cuanto mayor sea el tiempo que están en contacto el P añadido y el suelo, mayor será la fijación. Esto ocurre porque los productos de fijación van sufriendo nuevas alteraciones como la deshidratación y la reorientación de cristales.

Este hecho condiciona el momento de aplicación del fertilizante fosforado respecto a la siembra. También la forma en que se encare la fertilización en una rotación; vale decir que según el suelo sea más o menos fijador, se podrán hacer aplicaciones en dosis chicas y repetidas, o hechar todo el P en una sola aplicación.

- e) Temperatura: en trabajos de laboratorio se encontró que la fijación aumentaba con la temperatura (Mack y col., 1960; citados por Tisdale y Nelson).

Sin embargo, la importancia de la temperatura en la fijación, en condiciones de campo, no es conocida. Los suelos de climas cálidos son más fijadores, pero al mismo tiempo tienen mayor contenido de Fe y Al.

1.2. MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN DE LA FIJACIÓN DE P

Isotermas de adsorción

El método de caracterización de la fijación de P más usado, ha sido el de las isotermas (1,2,3,4,5,6, 7, 11,13,16,18,19,20,22,23,24,25,26,27,28,30 y 32).

Una isoterma de adsorción es una función que relaciona las cantidades de una sustancia presentes en cada una de dos fases que integran un sistema. Vale decir, para el sistema suelo, la cantidad de sustancias presente en fase sólida y la cantidad de sustancia en la fase líquida en equilibrio con la primera. Es decir que una isoterma de adsorción describe la relación de equilibrio entre las cantidades de compuesto adsorbido y disuelto, a una temperatura dada (28).

El nombre de isotermas deriva de que estas funciones son determinadas en base a experiencias que se llevan a cabo a temperatura constante.

Cuando se grafican las isotermas, tomando en abscisas la concentración de P en la solución y en ordenadas la cantidad de P adsorbido en fase sólida, se obtienen curvas que se achatan pareciendo aproximarse a un máximo, indicando una característica típica de las reacciones de adsorción química (1, 2,3,25 y 30) (Fig. 3).

La información primaria que brinda esta curva, es el conocimiento de la cantidad de P que debe existir adsorbido en la fase sólida del suelo, a una concentración dada en la solución en equilibrio (13).

De algunos suelos se obtienen isotermas que cortan el eje de las abscisas en valores positivos (Fig. 3b). Este hecho ha sido interpretado por Ryden y Syers (26) como un efecto debido al P nativo adsorbido, que sería liberado cuando el suelo se equilibra con soluciones de concentraciones bajas de fosfato. Esto explicaría entonces, los valores negativos de adsorción de P en la isoterma.

While y Beckett, 1964, citados por Ryden y Syers han sugerido que las concentraciones de P en solución a la cual la isoterma cruza la abcisa, esto es cuando no hay adsorción ni desorción neta, provee una estimación de la concentración de P en la solución del suelo. Este concepto también es manejado por Fox y Kamprath (1970).

Si se grafican las isotermas en escala semi-logarítmica (en ordenadas P adsorbido contra log de la concentración de P en la solución), se obtienen generalmente curvas que se aproximan bastante a líneas rectas (13). La pendiente de estas rectas representan la capacidad buffer del suelo, es decir la capacidad del suelo de amortiguar los cambios en la concentración de P en la solución del suelo (1,13). Esto significa que aquellos suelos que presentan alta capacidad buffer, se opondrán a los cambios de la concentración de P de la solución en dos sentidos; cuando se suministra P al suelo éste será retirado de la solución para ser fijado en su mayor parte; como contrapartida, cuando la planta retira P de la solución del suelo, la fase sólida se opondrá a esta disminución de la concentración liberando P.

Ha sido investigado por numerosos autores la concentración de P que hay que mantener en solución para alcanzar el máximo rendimiento en los distintos cultivos.

Para algunas plantas esta concentración óptima ha sido situada en 0,03 ppm, mientras que para otras puede ser 25 veces mayor (Asher, C.J. y Loneragan, J.F. 1967, citados por Fox y Kamprath).

Para la mayoría de las plantas se ha sugerido un valor promedio de 0,2 ppm (Beckwith, 1964; citados por Fox y Kamprath). La concentración óptima para el máximo crecimiento de una misma planta, puede variar según el tipo de suelos. Es sabido que a una concentración de P dada, en un suelo arcilloso y otro arenoso, la planta absorbe más en el primero (8).

Una de las utilidades de la isoterma de adsorción es que a partir de su conocimiento, es posible estimar que cantidad de P debe ser adicionado para obtener

la concentración óptima de P en la solución (13). Va le decir que permite un ajuste importante de la fertilización.

La isoterma brinda también una herramienta para la correcta interpretación de los resultados de ensayos de respuesta a la fertilización fosfatada. Ella posibilita una cuantificación de la fijación de P, y esta fijación está muy correlacionada con la eficiencia de los fertilizantes (5,12).

Barrow (1973) encontró en suelos diferentes distintas curvas de respuesta al fertilizante aplicado. Posteriormente demostró que esas diferencias estaban determinadas por la capacidad de fijación de esos suelos. Así llegó a ajustar una curva que muestra la relación inversa que existía entre una medida de la efectividad del fertilizante aplicado, y la capacidad de fijación. En ese ensayo la fijación explicó el 99,57% de la variación de la eficiencia del fertilizante (5).

Metodología de obtención de las isotermas

El procedimiento experimental que es usado para la realización de las isotermas, es descrito por numerosos autores (1,3,13,24,25,27,30,32).

Básicamente consiste en tomar varias muestras de un mismo suelo, agregarle soluciones con concentraciones de P creciente y permitir que se alcance un equilibrio en un tiempo determinado y a temperatura constante.

Luego las suspensiones de suelo son centrifugadas y es separada la solución sobrenadante. En esta solución se determina el P que no ha sido fijado por el suelo. El P fijado se calcula por la diferencia entre el P inicialmente ofrecido y el P remanente en solución. Con esta información ya es posible graficar las isotermas.

Si bien todos los autores coinciden en los lineamientos generales del método, difieren muchas veces en los detalles de su implementación, tales como tiempo de equilibrio, fuente de P, medio de la solución de P, etc.

Estos aspectos pasan a ser analizados seguidamente.

- Medio de la solución de P: las soluciones de P agregadas al suelo se preparan en medios salinos como AcONa o Cl_2Ca . Esto es fundamentalmente para facilitar la floculación de los coloides del suelo en la centrifugación, y obtener rápidamente un sobrenadante limpio.

El acetato de Na 0,1 M a pH 5,2 fue usado por Beck with (1964).

Ozanne y Shaw (1968) usaron Cl_2Ca 0,1 M. Posteriormente Fox y Kamprath realizaron un ensayo para comparar ambos procedimientos usando un suelo arcilloso (Typic Hapludult). Estos autores encontraron que en el sistema de acetato de Na las concentraciones de P remanente en solución son mayores, lo que representa una ventaja analítica a los efectos de la determinación de P en la solución (Fig. 4). No obstante esto optan por un medio de cloruro de calcio 0,01 M, puesto que permite la seguridad de obtener un sobrenadante limpio (puesto que el Ca^{++} tiene mayor poder floculante que el Na^+). Por otra parte, como puede verse en la fig. 4 la variación de la cantidad de P adsorbido con el tiempo de equilibrio es menor en el medio de Cl_2Ca que en el de AcONa .

El Cl_2Ca como medio fue usado también por numerosos autores (Cuadro 1).

- Fuente de P: las fuentes de P más usadas han sido $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y K_2HPO_4 o KH_2PO_4 .

- Rango de concentraciones de las soluciones de P:

a modo de ejemplo se citan algunos rangos usados por distintos autores: 25 a 2000 $\mu\text{g}/\text{gr}$. suelo (Fassbender, 1966); 0 a 2500 $\mu\text{g}/\text{gr}$. suelo (Ballard y Fiskell, 1974); 0 a 5.000 $\mu\text{g}/\text{gr}$. de suelo (Ballaux y Peaslee, 1975); 83 a 1000 $\mu\text{g}/\text{gr}$. de suelo (Singh y Jones, 1976).

Lo importante del rango de concentraciones de P es que luego de realizado el experimento, en las concentraciones en solución resultante estén comprendidas aquellas con las que normalmente se trabaja en los suelos. Esto facilita la comprensión del fenómeno de fijación a los niveles de P habituales del suelo.

- Actividad microbiológica: los micro- organismos presentes en la muestra del suelo pueden inmovilizar parte del P ofrecido, interfiriendo de esta forma con los resultados. Para eliminar esta interferencia generalmente se usan inhibidores microbiológicos. Una o dos gotas de Tolueno son usadas en la mayoría de los casos (2,13,23).

Bache y Williams (1971) usaron clorofermo.

No obstante, Ballaux y Peaslee(1975) no usan estos inhibidores por que encontraron que la inmovilización de P por parte de los micro- organismos no era importante.

- Tiempo de equilibrio: el tiempo de contacto entre el suelo y la solución de P agregada es otro de los factores que tiene influencia sobre la fijación.

Los tiempos de equilibrio que han sido usados son muy variados: desde 6 horas (11) a 6 días(2, 13, 27).

Fox y Kamprath investigando este t^opico determinaron que la concentración de la solución en equilibrio con el suelo variaba con el tiempo, alcanzando recién a los 6 días cierta estabilización(fig.4)

Olsen y Watanabe (1957) señalaron que la capacidad de retención aumenta ligeramente al variar el tiempo de reacción entre 24 y 72 horas, atribuyendo esto a interferencia por micro-organismos. Proponen entonces mantener 24 horas como tiempo de reacción (24).

Por su parte Fasssbender (1966) trabajando con los ácidos tropicales, usó tiempos de equilibrio que variaban de 1 hora a 188 horas. Encontró que la capacidad máxima de adsorción es una función del tiempo. Correlacionando los valores de la capacidad máxima de adsorción con el tiempo de contacto observó que esta dependencia toma la forma de una curva exponencial, indicando que en los momentos iniciales la reacción de adsorción ocurre con gran velocidad, lo cual disminuye paulatinamente, presentando arriba de las 100 horas de contacto aumentos casi insignificantes.

Concluye diciendo que no se puede determinar exactamente si se trata o no de un proceso asistótico (11).

Cabe señalar que durante el equilibrio, algunos autores agitan las suspensiones de suelo a lo largo de todo el período, mientras que otros realizan agitaciones intermitentes.

- Temperatura: en general todos los autores consideran que la fijación es función también de la temperatura (1,20). De esto surgiría la necesidad de que todo el experimento se lleve a cabo a una temperatura constante.

A los efectos de sintetizar los detalles metodológicos usados por distintos investigadores, se incluye el cuadro 1.

Otra cuestión vinculada a aspectos metodológicos, es el tratamiento que se debe dar al P adsorbido en el suelo con anterioridad al ensayo.

Este fosfato, si bien no modifica las características generales de la isoterma, provoca un corrimiento de la misma hacia cantidades de P adsorbido más bajas.

Olsen y Watanabe sostienen que de manera ideal, la adsorción debería ser determinada en un sistema en el cual la superficie estuviera libre de P. Como esta restricción no es factible, proponen realizar una corrección para el P de superficie inicial, su mando la cantidad de P inicial al P adsorbido en cada punto experimental. Con esta corrección la isoterma se desplaza hacia arriba, interceptando al eje de ordenadas en un valor más alto.

Bache y Williams (1971) realizaron las isotermas para dos muestras de un mismo suelo que habían recibido con anterioridad distintas cantidades de fertilizantes. En la fig. 5a. se muestran los resultados que obtuvieron; tratándose del mismo suelo, las características de fijación de ambas muestras son similares. No obstante, la muestra que había sido más fertilizada presentaba la isoterma corrida hacia abajo respecto de la otra.

Posteriormente realizaron la corrección para el P intercambiable por isótopos inicialmente presente, obteniendo una única isoterma para ambas muestras (fig. 5b).

La corrección es hecha en todos los casos para el P lábil presente en la fase sólida.

Fox y Kamprath realizaron las isotermas para los arcillosos y arenosos, con distintas fertilizaciones fosfatadas de 10 años de antigüedad. Para los suelos arcillosos obtuvieron diferencias en las isotermas similares a las encontradas por Bache y Williams; es decir que las muestras que había recibido más P fijaron menos, dando curvas más bajas aunque paralelas. Para los suelos arenosos las diferencias encontradas no fueron importantes.

La forma más usada por distintos investigadores para determinar el P adsorbido inicial, a los efectos de realizar esta corrección, ha sido la equilibración de las muestras de suelo con P^{32} .

No obstante estas consideraciones, son muchos los autores que no realizan la corrección (2,3,5,7,13, 16, 25,27,30,32).

En suelos poco fértiles la corrección es muy pequeña y puede despreciarse. También es despreciable el P inicialmente presente en el suelo, cuando se trabaja con isoterma a valores altos de concentraciones de P en solución.

Por otra parte, conociendo la existencia de este efecto, si no se hace la corrección, la isoterma debe interpretarse como cantidad de P que debe ser agregado para alcanzar una concentración dada en solución.

1.3. MODELOS E INDICES PROPUESTOS PARA DESCRIBIR

LA FIJACION

Obtenidos los resultados experimentales en ensayos de adsorción, se buscaron modelos matemáticos que se ajustaran a los mismos, que sirvieran para caracterizar el fenómeno, y a partir de los cuales extraer índices de fijación.

Algunos autores no utilizaron modelos preestablecidos optando por índices simples.

A continuación se hará una reseña de los modelos e índices propuestos.

1.3.1. Ecuación de Freundlich

La ecuación desarrollada por Freundlich fue creada originalmente para describir matemáticamente la adsorción de gases por sólidos; pero también ha sido utilizada con cierto éxito en sistemas sólido-líquido, aunque sin un tratamiento teórico riguroso (28).

Esta ecuación puede ser presentada como sigue:

$$y = a \cdot c^{1/n}$$

donde:

y = fosfato adsorbido por unidad de peso de suelo.

c = concentración de P en la solución en equilibrio.

a; n = constantes.

Es una ecuación empírica cuyos parámetros no tienen una explicación física conocida (1; 19; 24). No obstante implica que la energía de adsorción disminuye exponencialmente con el incremento de la saturación de la superficie (1).

Esta ecuación puede ser transformada en una función lineal aplicando logaritmos a ambos términos:

$$\log. y = \log. a + 1/n \cdot \log. c \quad (1)$$

El valor del exponente de la concentración (1/n), generalmente es menor que 1 y está relacionado con las características del adsorbente (19). Otra característica del exponente es que es independiente del tiempo (19). Esto último implica que la pendiente en la transformación lineal de la ecuación, no cambia con los tiempos de reacción.

La ecuación de Freundlich se ajusta bien para amplios rangos de concentraciones de P en solución y grandes cantidades de P adsorbido (20;24).

Los datos del suelo graficados de acuerdo a esta ecuación (forma no lineal), generalmente dan curvas suaves (1).

No se puede mediante este modelo calcular un máximo de adsorción.

La ecuación de Freundlich ha sido usada, entre otros, por Russell y Prescott (1916); Kurtz, de Turk, y Bray (1946); Low y Black (1950); citados por J.K. Syers y col. 1973; (28).

1.3.2. Ecuación de Langmuir

La ecuación de Langmuir, al igual que la de Freundlich, fue creada para describir la adsorción de gases en sólidos. Del mismo modo, fue aplicada con frecuencia a la adsorción de líquidos e iones de soluciones por sólidos.

La ecuación se escribe como:

$$x/m = \frac{K \cdot B \cdot c}{1 + K \cdot c} \quad (24)$$

donde:

x/m = P adsorbido por unidad de peso del suelo.

c = concentración de P en la solución en equilibrio.

b = máximo de adsorción

K = constante relacionada con la energía de adsorción.

Esta ecuación ha sido transformada a una forma lineal como sigue:

$$\frac{c}{x/m} = \frac{1}{K \cdot b} + \frac{c}{b} \quad \text{donde: } \frac{1}{b} = \text{pendiente}$$

$$\frac{1}{K \cdot b} = \text{intercepto}$$

De la pendiente de la isoterma puede ser calculado el máximo de adsorción (b), y la constante de energía de retención (K) se calcula como:

$$K = \frac{\text{pendiente}}{\text{intercepto}} = \frac{1/b}{1/K \cdot b}$$

La posibilidad de calcular un máximo de adsorción y la energía con que es retenido el ión adsorbido, es señalada por numerosos autores como ventaja de esta ecuación frente a la ecuación de Freundlich (3,24;28).

Ballard y Fiskell (1974), calcularon el máximo de adsorción que surge de la ecuación de Langmuir, y lo compararon con un máximo de adsorción calculado por saturación con 2500 µg de P por gramo de suelo. Constataron que el b de Langmuir en valor absoluto es dos o tres veces menor que el máximo obtenido por saturación, no obstante lo cual la correlación entre ambos fue muy alta (r=0,986).

Esta estrecha relación sugiere que a pesar de que los datos obtenidos a través de la isoterma de Langmuir no dan índices absolutos de la retención del P, reflejan adecuadamente las capacidades de retención del P en forma relativa (2).

Con anterioridad, Olsen y Watanabe ya habían comunicado que los valores del máximo de adsorción de Langmuir son mucho más bajos que aquellos encontrados por métodos en los que se usaban soluciones de P más concentradas (24).

Con respecto al parámetro K de la ecuación de Langmuir (energía de adsorción), Bache y Williams (1971) sostuvieron que no es buen índice de caracterización de la fijación, porque ésta es función del número de emplazamientos de adsorción (o superficie adsorbente) más que de la energía de enlace.

Los principales postulados en los que se basa la isoterma de Langmuir (21), son:

- 1 - La energía de adsorción es constante (implica la existencia de sitios de adsorción uniformes y la no interacción entre las moléculas adsorbidas).
- 2 - La adsorción se realiza en sitios localizados (implica que no existe movimiento de traslación de las moléculas adsorbidas en el plano de la superficie).
- 3 - El máximo de adsorción posible corresponde a la formación completa de una capa monomolecular del ión adsorbido.

Parece ser poco probable que estos postulados se cumplan en el complejo sistema del suelo. Por ejemplo, la energía de adsorción del P es probable que sea constante únicamente dentro de limitados rangos de concentración (21).

Numerosos investigadores encontraron que la ecuación de Langmuir se ajustaba bien a los datos experimentales sólo a bajas concentraciones de P en solución, produciéndose a altas concentraciones desvíos respecto a la recta (1;3;20;24;28).

Bache y Williams señalan que la gráfica de Langmuir era aproximadamente lineal en un rango de concentraciones de $0,5 \times 10^{-4}$ M a 5×10^{-4} M, mientras que sobre rangos más amplios de concentraciones las gráficas eran curvas. Interpretan esta curvatura como evidencia de que la energía de fijación no es constante en realidad, y de que no existe un máximo de adsorción definido. Sostienen que una posible razón para esto es que el fosfato adsorbido migra a estratos subsuperficiales.

Syers y col. (1973), citan a varios autores que comunicaron haber encontrado desviaciones de la relación lineal de Langmuir a concentraciones de P en equilibrio por encima de 15 $\mu\text{g/ml}$.

Por su parte, Kuo y Lotse (1974) explicaron la desviación de la isoterma de Langmuir a concentraciones altas de P, por un aumento en el potencial negativo total de la superficie debido a la adsorción del P y un incremento en la interacción entre los iones fosfato adsorbidos.

Con baja saturación de la superficie adsorbente, los iones adsorbidos pueden colocarse a bastante distancia entre ellos, no existiendo interacción mutua. En estas condiciones, la energía de adsorción es constante y puede ser esperada una concordancia de los datos experimentales con la ecuación de Langmuir.

Olsen y Watanabe (1957), señalaron que la concordancia de los datos experimentales con la isoterma de Langmuir, si bien puede ser considerado como una evidencia de la existencia de una capa monomolecular en el máximo de adsorción, no podía ser asumido como una prueba definitiva de ello como lo es en su aplicación a los gases.

Ballard y Fiskell (1974) sostienen que el hecho de que el máximo de adsorción de Langmuir () sea menor que el máximo obtenido por saturación del suelo con una solución de P concentrada, evidencia la debilidad teórica de asumir que la adsorción en monocapa es el único mecanismo que opera en la retención del P en el sistema del suelo.

A los efectos de contemplar las desviaciones de la isoterma de Langmuir que ocurren a altas concentraciones de P en solución, Gunary (1970) (citado por Ballaux y Peaslee), propuso la incorporación de un término cuadrático a la ecuación.

Por otra parte otros autores interpretaron la forma curvilínea de la gráfica como indicador de la presencia de dos o tres tipos de situaciones de adsorción, proponiendo el ajuste de una ecuación de Langmuir para cada una de esas situaciones (3, 25;28).

Finalmente corresponde señalar que la concordancia de los datos experimentales de adsorción de P con la isoterma de Langmuir, no implica necesariamente la presencia de ningún mecanismo de reacción o adsorción específico (24).

1.3.3. Índices de Fijación

Los parámetros b y K de la ecuación de Langmuir fueron usados por numerosos autores, como índices para caracterizar la fijación de fosfato.

No obstante, ha sido propuesto el uso de otros índices, algunos de los cuales son extraídos de las isotermas de adsorción mientras que otros surgen de experimentos de adsorción más simples.

- Requerimiento standard de P: Este índice surge de calcular medianamente la isoterma de adsorción, la cantidad de P adsorbido por el suelo para alcanzar una concentración determinada en solución.

Barrow(1970), propone el uso de este índice en lugar del máximo de Langmuir (b), argumentando que los requerimientos básicos del modelo de Langmuir no se cumplen en los suelos (4).

Con anterioridad, Beckwith (1965), citado por Juo y Fox (1977), ya había propuesto este índice sugiriendo que las comparaciones fueran hechas a una concentración standard de P en solución de 0,2 ppm. ya que es una concentración que promedialmente satisface los requerimientos de P de los distintos cultivos. Juo y Fox adoptaron esta sugerencia y llamaron al P adsorbido por el suelo para mantener esa concentración "requerimiento de P standard".

La concentración de 0,2 ppm. fue adoptada también por otros autores (4,5;7,18). McKenzie y col.(1977) emplean este índice pero calculándolo a 0,3 ppm.

Bache y Williams (1971), sostienen que es inconveniente el uso del "requerimiento estandar" para comparar distintos suelos cuando las isotermas se cruzan. Esto determina que pueda atribuirse índices de igual valor a suelos con isotermas francamente diferentes (figura 6). Sin embargo, señalan, las isotermas se cruzan sólo a bajas concentraciones en la solución porque ese efecto se debe a diferencias en la cantidad inicial de P nativo adsorbido en los suelos. La comparación a concentraciones más altas evita este problema, ya que puede despreciarse el efecto señalado (1).

- Adsorción a partir de una cantidad constante de

P agregado: Este es un experimento de adsorción más simple, ya que para la isoterma se requieren varios puntos.

Si se agregan pequeñas cantidades de P, este índice no distinguirá entre suelos diferentes, ya que todos adsorberán la mayoría del P ofrecido. Pero puede ser un buen índice si las comparaciones se hacen con agregados importantes de fósforo (1).

Este índice fue usado con dos variantes: en una se expresa el P adsorbido como porcentaje del P ofrecido; en la otra el P adsorbido se expresa en cantidades absolutas.

Udo y Uzu (1972), calcularon el % de P adsorbido cuando agregaban 1 mg. de P por cada gramo de suelo. Encontraron que estos porcentajes variaron desde 25 a 97%, trabajando en suelos ácidos tropicales.

Por otra parte, Vijayachandran y Harter (1975), trabajando con amplio rango de suelos, determinaron el máximo de Langmuir (b), y el % de P adsorbido, cuando agregaban 100 µg de P por gramo de

suelo. Obtuvieron correlaciones significativas entre ambos índices ($r=0,77$), a pesar de lo cual concluyen que el máximo de Langmuir es más importante porque surge de una serie de valores de adsorción más que de un valor único.

Khalid y col. (1977), hacen uso de este índice expresándolo en valores absolutos. Trabajando con suelos superficiales (Alfisoles e Inceptisoles) bajo cultivo de arroz, encontraron un rango de adsorción de P de 0 a 483 $\mu\text{g.}$ por gramo de suelo a partir de agregados de 500 $\mu\text{g. p/gr.}$ suelo.

Bache y Williams sostienen la conveniencia de que las comparaciones de la adsorción de P de distintos suelos sean hechas a iguales concentraciones de P en la solución en equilibrio. Critican entonces a este índice la violación de ese principio. Proponen compensar el efecto de la variación de c (concentración de P en la solución), usando como índice el cociente x/c ó $x/\log. c$, donde x es P adsorbido.

- Capacidad buffer del suelo: Este índice fue usado por McKenzie y col. (1977), y lo calculaban como la cantidad de P necesaria para aumentar la concentración en la solución en equilibrio de 0,2 a 0,3 ppm.
- Pendiente de la isoterma: $dx/d\log.c$. La pendiente de la isoterma ha sido interpretada por numerosos investigadores como la capacidad buffer del suelo respecto al fosfato.

Bache y Williams la usaron como índice de referencia con el cual compararon otros, por considerarla el valor simple más notable de la isoterma de adsorción y una característica básica del suelo.

La pendiente es constante si las isoterms son lineales; pero usualmente son curvas y la pendiente varía con la variación de las concentraciones de solución en equilibrio. Por esto, los autores mencionados, proponen que las pendientes de las isoterms sean comparadas a la misma concentración de equilibrio.

1.4. ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DE LA FIJACION

En esta parte se procura exponer ordenadamente, resultados de investigaciones sobre adsorción de P que han sido encaradas con objetivos similares.

1.4.1. Relaciones de la fijación con características de los suelos

- Arcilla: Udo y Uzu (1972) realizaron análisis de regresión entre el porcentaje de P adsorbido a partir de agregados de 1 mg. de P por gr. de suelo, con distintos factores de los suelos. Para la arcilla encontraron que el coeficiente de correlación era positivo y altamente significativo ($r=0,83$). La ecuación de regresión determinada fue $y = 14 + 1,88 x$. Los suelos estudiados eran ácidos tropicales.

Concluyen que los minerales arcillosos proveen espacios de adsorción para el P, y exponen la hipótesis de que la fijación de P por estos minerales es debida al Al contenido en los mismos. Citan un trabajo de Ellis y Troung (1955) en el que encontraron que la montmorillonita no fijó P luego que le fue quitado todo el Al y el Fe.

Ballard y Fiskell (1974), en trabajos con suelos forestales ya aludidos en otra parte también encontraron correlaciones positivas entre % de arcilla y dos índices: el % P adsorbido por un lado, y el máximo de Langmuir por otro.

El coeficiente de correlación con el primer índice mencionado fue de 0,755 (significativo al 0,1%). Pero cuando se calculó la correlación parcial del % arcilla independizando el efecto del Al extraído con NH_4OAc , este coeficiente se redujo a 0,32*.

Concluye que el efecto de la arcilla está relacionado al del Al extractable con acetato de NH_4 , pero que ella tiene también un efecto significativo independiente.

A efectos ilustrativos, es interesante señalar que el promedio del % arcilla de los suelos usados era de 3,95%, mientras que el rango de variación era de 0,1% a 20,4%.

Juo y Fox (1977) por su parte, trabajando con suelos que representaban amplia gama de condiciones agroclimáticas de los trópicos, encontraron una correlación de $r=0,73^{**}$ entre el % arcilla de dichos suelos y el requerimiento standard de P (a 0,2 ppm).

Numerosos trabajos de distintos autores han obtenido resultados similares, en el sentido de encontrar relaciones positivas entre el contenido de arcillas de los suelos y sus capacidades de fijación (11; 13;28;30).

- Hierro y Aluminio: En la experiencia citada de Ballard y Fiskell se estudió también la correlación de la adsorción de P con el Al y el Fe extraídos por distintos extractantes.

Las correlaciones encontradas con el Al fueron altas y significativas al 1%, cualquiera fuera el reactivo usado. De todos los extractantes del Al, el AcONH_4 1 N (pH 4,8), fue el mejor correlacionado con la retención de P. Este reactivo aparentemente extrae Al del suelo en proporción a la cantidad de formas activas presentes.

Los coeficientes de correlación entre la retención de P y el Al extraído por otros reactivos fueron todos muy similares a pesar de las diferencias en la cantidad de Al que extrajo cada uno; esto sugiere que extraían la misma forma de Al sólo que con distinto grado de eficiencia.

Por otra parte, la correlación entre la retención de P y el Fe extraído por los distintos reactivos variaba en función de la cantidad de Fe que extraía cada uno. El oxalato de amonio fue en este caso el mejor extractante.

Mediante análisis de correlación múltiple, determinaron que el orden de actividad del Fe y el Al por unidad de peso en la retención del P es: intercambiable > amorfo > cristalino.

La forma del Al activo (intercambiable + amorfo) daba el mejor índice de retención de P. Concluyen los autores que en los suelos estudiados el Al está todo bajo una forma similar, no ocurriendo lo mismo con el Fe. Esto explica porque a pesar de la diferente eficiencia en extraer Al de los distintos reactivos, todos se correlacionan bien con la retención de P. No era así con el Fe, porque los distintos extractantes atacaban formas muy diversas del Fe del suelo.

Por último, encontraron que el Al activo contribuye más a la fijación en los suelos estudiados, pero esto es por encontrarse en mayor cantidad que el Fe activo. A igualdad de peso tanto el Al activo como el Fe activo contribuyen aproximadamente por igual a la capacidad de retención del P.

Udo y Uzu por su parte, investigaron también la importancia del Fe y el Al en la fijación del P. Por un lado hallaron las correlaciones entre los sesquióxidos extractables con oxalato o citrato-ditionito, y la adsorción del P. Estas correlaciones fueron altas para ambos reactivos, mostrando los resultados que posiblemente extrajeran la misma forma de sesquióxidos (amorfa). Esto estaba en contradicción con resultados anteriores (Sre, Ramulu, Pratt y Page, 1967, citados por Udo y Uzu), donde las correlaciones con el Fe y el Al extraídos por oxalato eran mayores.

Por otro lado, para determinar la importancia del mecanismo de precipitación, buscaron las correlaciones entre la fijación de P y las formas intercambiables de Fe y Al, ya que este mecanismo depende de las actividades de los iones Fe^{+3} y Al^{+3} en solución y en el complejo de intercambio. Estas correlaciones fueron significativas a los niveles de 1 y 0,1% para el Fe y el Al respectivamente.

No obstante, los autores concluyen que las correlaciones halladas no confirman que el mecanismo de precipitación esté implicado. Sostienen que el Al es un ión fuertemente adsorbido en las partículas del suelo (superficie de arcillas u óxidos amorfos), por lo que su actividad en solución es de poca importancia. De esa forma, tal como lo afirmó Hsu (1964), será difícil distinguir entre adsorción y precipitación, pero dada las bajas actividades de Fe^{+3} y Al^{+3} en la solución del suelo (concluyen Udo y Uzu), la precipitación parecería ser de menor importancia que la adsorción.

Los valores de los coeficientes de correlación y las rectas de regresión encontradas en el trabajo mencionado se exponen a continuación:

<u>Propiedad del suelo</u>	<u>Ecuación de regresión</u>	<u>Coeff. de Correlación</u>
Al_2O_3 Ditionito-Citrato	$Y = 25,7 + 4,73 X$	0,766 *
Al_2O_3 Oxalato	$Y = 31,6 + 29,5 X$	0,719*
Fe_2O_3 Ditionito-Citrato	$Y = 39,4 + 5,9 X$	0,705*
Fe_2O_3 Oxalato	$Y = 12,3 + 354,1 X$	0,682*
Al intercambiable	$Y = 25,6 + 26,3 X$	0,970***
Fe intercambiable	$Y = 28,9 + 1,06 X$	0,717 *

Y = % de P adsorbido a partir de un agregado
de 1 mg.P/gr. suelo

Analizando las correlaciones anteriores, los autores hacen notar que aquellas que implican óxidos de Al son más altas que las que implican óxidos de Fe. Lo mismo ocurre entre el Al y el Fe intercambiables. Concluyen entonces que en los suelos usados (ácidos tropicales), los compuestos de Al son más activos adsorbiendo P que los compuestos de Fe. Esta conclusión concuerda con la opinión de varios investigadores que señalan la mayor importancia del Al que del Fe (Taylor y Gurney, 1965; Bromfield, 1964; Hsu, 1965; citados por Udo y Uzu).

Barrow (1970), trabajó con suelos que representaban un amplio rango de condiciones, y usó como índice de adsorción el requerimiento de P standard (a 0,2

ppm en la solución). Encontró alta correlación entre la adsorción así calculada y el contenido de Al extractable de los suelos ($r = 0,90$), mientras que obtuvo regresiones parciales no significativas para el Fe extractable cuando éste se incluía como variable adicional. Saca entonces también él la conclusión de la mayor importancia del Al que el Fe.

Fassbender (1966) a continuación de un experimento de adsorción de P, realizó un ensayo de desorción. Este consistió en 20 extracciones con agua del P previamente adsorbido. El P desorbido en estas condiciones fue muy poco, menos del 10% del P-retenido. Entonces procedió a extraer los fosfatos posiblemente precipitados, con extractores específicos (fraccionamiento según el método de Chang y Jackson). De los resultados se concluyó que los fosfatos no desorbibles con agua se presentan en forma de fosfatos de Al, Fe y Ca, siguiendo las fracciones ese orden de predominancia.

Comparó luego las cantidades de fosfatos adsorbidos (solubles en agua) con los precipitados (P-Al, P-Fe, P-Ca) y concluyó que en los suelos estudiados (fuertemente ácidos) la precipitación jugaba un papel más importante que la adsorción en la retención de P. Esta conclusión es opuesta a la sostenida posteriormente por Udo y Uzu.

Vijayachandran y Harter (1975) trabajaron con amplio rango de suelos y los equilibraron con las soluciones de P por espacio de una hora solamente, por lo que suponían que tan solo los componentes más reactivos del suelo reaccionaban con el P aplicado. Correlacionaron dos índices de adsorción con la cantidad de Fe y Al extraída por acetato de amonio, ditionito, o HCl-NaOH.

No encontraron una correlación significativa entre Fe extraído y el P adsorbido. En la mejor correlación, 20,3% de la variación de los máximos de Langmuir podía ser explicado por el Fe extractable con HCl-NaOH. Esta correlación puede, sin em

bargo, ser artificialmente alta por la interrelación entre el Fe y el Al extractado con HCl-NaOH. Manifiestan estos autores que de acuerdo a estos resultados, el rol del Fe es secundario y que las correlaciones entre adsorción de P y el contenido de Fe del suelo comunicadas anteriormente, pueden ser significativas sólo en áreas localizadas donde los contenidos de Al y M.O. son más constantes y por tanto el Fe puede ejercer una influencia más directa en la adsorción.

Sin embargo, Juo y Fox (1977), en el trabajo ya citado, obtuvieron una alta correlación ($r=0,77^{**}$) entre el Fe_2O_3 libre extractado con citrato-ditionito-bicarbonato y el requerimiento standard de P (a 0,2 ppm).

En este mismo estudio (Vijayachandran y Harter) se encontró que el Al extraído con acetato de amonio y el aluminio extraído con HCl-NaOH estaban correlacionados significativamente con el máximo de Langmuir. Como los Al extraídos por estos dos extractantes no están correlacionados entre sí, las dos cantidades aparentemente afectan la adsorción de P. La correlación múltiple entre el máximo de adsorción vs. las dos formas de Al resultó en un aumento significativo del coeficiente de correlación ($r=0,83$). O sea que el 69% de la variación en el máximo de adsorción pudo ser explicado por la variación en el Al extraído por los dos extractantes.

El NH_4OAc a pH 4,8 extrae la forma del Al relativamente disponible, por lo tanto su correlación con la adsorción era esperada; pero la cantidad de este Al es relativamente chica, y es prácticamente la responsable de toda la adsorción de P. El tratamiento con HCl-NaOH es muy enérgico y probablemente destruya sitios de adsorción de P, por lo que era razonable esperar también una alta correlación entre el Al extraído por este método y la fijación de P.

Khalid y col. (1977), estudiaron la adsorción de P en suelos inundados. Encontraron correlaciones significativas entre el Fe extraído por oxalato y la adsorción de P, tanto en condiciones de oxidación como de reducción.

El Fe extraído por el oxalato (óxidos amorfos de Fe) parece ser el que contribuye más a la fijación en suelos inundados según los resultados de este trabajo. En condiciones de reducción era liberado más Fe amorfo por la solución de oxalato, lo que indica un aumento de la superficie reactiva. La mayor fijación de P en condiciones reductoras en un suelo anegado, sería debido a la transformación de férrico a ferroso dando más puntos de adsorción.

Otros autores que encontraron también relación entre la adsorción del P y distintas formas de Al y Fe fueron Syers y col. (1973), y Kuo y Lotse (1974).

- pH En el trabajo de Udo y Uzu se obtuvo una fuerte correlación negativa entre el pH y la adsorción de P. Cabe recordar que estos autores trabajaron con suelos ácidos cuyos pH oscilaban entre 3,5 y 5,9. El coeficiente de correlación fue - 0,74, y la ecuación de regresión:

$$y = 142,4 - 19,8x$$

Los autores sostienen que probablemente esta correlación se deba al efecto del pH sobre el Al intercambiable, y fundamentan esta interpretación en el hecho de haber encontrado una correlación también alta entre pH y Al ($r = 0,79^{**}$).

La relación entre adsorción y pH encontrado por Syers y col. (1973) también era inversa.

Sin embargo, Ballard y Fiskell (1974) encontraron una correlación significativa entre la adsorción (P adsorbido a partir de 2500 µg P ofrecido/ gr. de suelo) y el pH, pero positiva ($r=0,53^{***}$). El rango de pH de los suelos usados era de 3,1 a 6,2. Estos autores sostienen que la discrepancia de este resultado con los obtenidos por Udo y Uzu y otros autores, se debe a que en los suelos que usaron (planicies costeras forestadas), los de menor pH son arenosos, muy fácilmente filtrables, con contenido muy bajo de Fe y Al y por lo tanto con baja capacidad de fijación.

- Materia Orgánica - el rol de la M.O. en la fijación del P parece ser controvertido. Si bien está generalizado el concepto de que ésta no participa en la fijación, y que más bien incrementa la solubilidad del P (17; 29), muchos resultados experimentales reflejan una relación positiva entre M.O. y fijación. Se ha interpretado que esa relación puede ser debida a la correlación que a su vez existe entre la M.O. y otros factores que sí intervienen directamente en este fenómeno.

Ballard y Fiskell obtuvieron un coeficiente de correlación de 0,43 (significativo al 1%) entre las pérdidas por ignición y la adsorción de P. Pero el coeficiente de correlación parcial descendía a 0,086 cuando era corregido por el efecto del Al extraído con NH_4OAc . Según este resultado, la asociación entre la M.O. y el P sería indirecta a través de su asociación con el Al.

Por su parte, Udo y Uzu no encontraron correlación significativa de la fijación con la MO ($r = 0,56^{NS}$; $y = 26,4 + 12x$). Sostienen entonces que en los suelos estudiados la M.O. no participa en la adsorción.

Por último, se expondrán los resultados de un trabajo de Singh y Jones (1976) por considerarlo de interés.

Estos investigadores estudiaron el efecto que tenía sobre la capacidad de adsorción de P de un suelo, el agregado de distinto tipo de residuos orgánicos.

Usaron un suelo altamente fijador, y lo incubaron con los diferentes residuos por espacio de 30, 75, y 150 días. Luego determinaron la capacidad de fijación de las muestras.

Encontraron que con 30 días de incubación, todos los residuos hacían decrecer la cantidad de P adsorbido por el suelo, respecto al control. Esto sería por que ocurre una parcial descomposición de la M.O. y los microorganismos no necesitarían P adicional, siendo suficiente el de la M.O. Así, no hay utilización del P del suelo, y el P agregado con la M.O. incrementa las concentraciones de P en equilibrio en la solución. Otra explicación puede ser el bloqueo de sitios de adsorción por productos de descomposición.

Cuando las incubaciones eran de 75 o 150 días el efecto sobre la capacidad de adsorción dependería de la calidad del residuo en cuanto a su contenido de P.

Se vió que las muestras incubadas con residuos pobres en P, adsorbían más P que el control, mientras que las muestras incubadas con residuos ricos en P adsorbían menos que el control. El valor crítico de P en los residuos era de 0,3%. O sea que cuando se agregaban residuos con más de 0,3% de P, era posible esperar una mineralización a partir de la M.O., y consecuentemente una reducción de la capacidad de fijación. Si los residuos tenían menos de 0,3% de P, podía esperarse una inmovilización de P y por tanto un incremento en la capacidad de fijación.

De acuerdo con estos resultados, la descomposición microbiana de los residuos orgánicos agregados, cambia la adsorción de P por el suelo.

La importancia de esto es que el uso de la técnica de isoterma de adsorción para predecir los requerimientos de P, debería considerar el tipo y cantidad de M.O. agregada al suelo, su contenido de \bar{P} , y el tiempo que sigue a la adición. Luego de cada aporte de M.O., la curva de adsorción debería ser reconstruída, o debería estimarse la cantidad de P liberado o inmovilizado por la descomposición de la M.O. (27).

- Area de Superficie: El área de la superficie de los minerales del suelo, es un factor que también ha sido estudiado en relación a la fijación de P.

En 1957, Olsen y Watanabe midieron el área de la superficie a través de la retención de etilenglicol según el método de Bower y Gschwend. Hallaron luego una estrecha relación entre el área así determinada y el máximo de adsorción tanto en suelos ácidos como alcalinos. Los coeficientes de correlación y las ecuaciones de regresión obtenidas fueron:

$$r = 0,98 \quad y = 0,276x + 3,47 \quad \text{para los suelos alcalinos}$$

$$r = 0,96 \quad y = 0,641x + 5,73 \quad \text{para los suelos ácidos}$$

En 1974, Prakash y Bhasker hacen lo propio usando el método de etilenglicol de Bower y Bertzen modificado (1959), y también obtienen un buen acuerdo entre el área y la fijación de P.

Por último, en 1977 Juo y Fox determinaron el área de superficie específica de un amplio rango de suelos a través de la absorción de N_2 a $-196^\circ C$. Esa superficie se correlacionó positivamente con la adsorción de P presentando un coeficiente de correlación de $r = 0,95$ ***.

- Regresiones Múltiples: En varios trabajos se efectuaron regresiones múltiples entre la adsorción de P y varios factores del suelo. Algunas de ellas se exponen a continuación:

Ballard y Fiskell incluyeron en la regresión el Al extractable con NH_4OAc , el pH del suelo y el contenido arcilloso del mismo. Los 3 coeficientes de regresión resultaron significativos al nivel del 1%, y las tres variables explicaron el 93% de la variación de la retención de P.

Vijayachandran y Harter (1975) realizaron el análisis de regresión múltiple del máximo de adsorción vs. el carbono orgánico y el Al extraído con HCl-NaOH . La correlación fue significativa ($r = 0,83$) y mejor que cualquier correlación simple.

El efecto de 3 variables (carbono orgánico, Al extraído con NH_4OAc y Al extraído con HCl-NaOH) sobre el máximo de adsorción era independiente y aditivo. Esto lo demostraba un coeficiente de correlación múltiple ($r=0,90$) que era significativamente mayor que cualquier combinación de 2 variables independientes.

Por último, en la experiencia ya citada de Khalid y col. donde se investigaba la retención de P por el suelo en condiciones de oxidación y reducción, también se usó el análisis de regresión múltiple. Las ecuaciones de regresión halladas son las siguientes:

En condiciones de oxidación:

$$Y \text{ (P retenido)} = -269 + 84 \text{ (C total)} + 0,05 \text{ (Fe extraído con oxalato)} \\ -0,93 \text{ (P extrac. Bray-2)} + 36,5 \text{ (potencial fosfato)}$$

De este modelo se excluyeron las variables arcilla, pH y P extractable con CaCl_2 0,01 M por que no producían F significativo al 5%. Las variables que fueron incluidas explicaban el 85% de la variación del P adsorbido en condiciones de oxidación.

En condiciones de reducción:

$$Y \text{ (P retenido)} = -237 + 0,03 \text{ (Fe extraído con caxalato)} - 254 \text{ (P extrac. CaCl}_2\text{)} \\ + 83,4 \text{ (pH suelo)} + 83,6 \text{ (C total)} \\ r^2 = 0,80$$

De esta ecuación se excluyó el potencial fosfato por no ser significativo.

1.4.2. Etapas en la fijación de fósforo

Varios investigadores han reconocido dos etapas en el proceso de fijación de P: una reacción inicial rápida, seguida por una reacción relativamente lenta.

La reacción inicial se atribuye a un intercambio de iones fosfato por iones OH^- en las superficies de las partículas del suelo. Los iones fosfato se van adhiriendo al Fe y Al intercambiable, a iones Ca^{++} de la arcilla, y a óxidos hidratados, o también a estos mismos iones que se encuentran en los bordes de las estructuras cristalinas (24).

La reacción lenta tendría lugar por el incremento en el tamaño de los cristales de P-Fe y P-Al, siendo aportados estos iones metálicos a partir de la descomposición de los minerales arcillosos y los óxidos hidratados (24).

Low y Black (citados por Olsen y Watanabe), señalan que la primera reacción alcanzaría un punto final definido con el tiempo. Olsen y Watanabe por su parte, sugieren que el grado de esa reacción inicial puede ser representado por el máximo de adsorción de la isoterma de Langmuir. Sostienen que la fracción del P adsorbido que se equilibra con P^{32} (o P de superficie), está relacionada con la concentración de P en equilibrio de acuerdo a la isoterma de Langmuir.

Encontraron que prácticamente todo el P inicialmente adsorbido dentro de las 24 horas, se equilibraba con P^{32} adicionado. Sin embargo, con tiempos de reacción más prolongados, parte del P adsorbido no se intercambia con P^{32} y por tanto no está en equilibrio con el P de la solución del suelo.

Fassbender (1966), citaba un trabajo de Hsu (1964) donde este autor informa que el proceso de retención de P es el resultado de 2 reacciones: la primera que se completa en corto tiempo debiéndose a la adsorción de P a los hidróxidos del suelo y obedeciendo a la isoterma de Langmuir; la segunda, más lenta, correspondiendo a la adsorción en hidróxidos amorfos desarrollados en el transcurso del experimento, sin obedecer a la isoterma mencionada. Hsu discute la posibilidad de que la primera reacción constituya adsorción de P propiamente dicha (o sea, en la acepción que se le dió al término en apartado 1.1), mientras que la segunda reacción constituya precipitación de P.

Munns y Fox (1976), con un enfoque parecido encaran el estudio de la reacción lenta por entender que esta es de gran importancia en los efectos residuales del P.

Prakash y Bhasker (1974) llevaron a cabo un trabajo con el objetivo de determinar la relación entre el Al intercambiable, la acidez intercambiable y la adsorción de P en suelos ácidos arcillo-arenosos y con contenido alto de aluminio.

La adsorción de P la determinaron mezclando muestras de suelo (2 grs.) con 20 ml. de una solución de KH_2PO_4 de 240 ppm a una temperatura de 25°C . Luego de 15 minutos, 30 minutos, 1, 2, 3, ... y 24 horas centrifugaban y determinaban el P remanente.

Llamaron "adsorción a tiempo cero", a aquella que ocurría en el tiempo necesario para mezclar los dos gramos de suelo con los 20 ml. de solución. A la adsorción de P luego de 24 horas de contacto le llamaron "adsorción máxima".

Estos autores constataron la existencia de los dos tipos de reacciones: una rápida que se completa alrededor de los 30 minutos y otra más lenta.

Luego observaron que existía una clara correlación entre la adsorción de P a tiempo cero y el Al intercambiable, suponiendo entonces que es éste el responsable de la fijación de P en las primeras etapas. A medida que pasa el tiempo, comienza a dominar el Al no intercambiable, y el suelo con mayor contenido presentará un valor más alto de adsorción de P. Hay buena correlación entre el Al extraído por citrato-ditionito y la adsorción máxima de P medida después de las 24 horas de reacción.

Los datos de este trabajo mostraron también un buen acuerdo entre el área de la superficie (medida por el método de la retención de etilen- glicol) y el máximo de adsorción de P. Esto concuerda con los resultados de Olsen y Watanabe (1957). Sin embargo, no se vió correlación entre el área de la superficie y la adsorción de P a tiempo cero.

CAPITULO 2

MATERIALES Y METODOS

Se seleccionaron 39 suelos, tratando de abarcar los tipos de suelos más representativos del país, es decir aquellos que ocupan áreas más extendidas. El único suelo que escapa a esta norma es el número 27 (Inceptisol Umbrico), que fue incluido por revestir un interés especial.

Las muestras de suelos fueron tomadas de la Dirección de Suelos y Fertilizantes (M.A.P.), con el asesoramiento de los técnicos de dicha Dirección.

En el cuadro 2 se presentan los suelos y los datos analíticos y descriptivos que se consideraron más importantes a los efectos de caracterizarlos.

Los P-Al, P-Fe, P-Ca fueron determinados por el método de fraccionamiento de fósforo propuesto por Chang y Jackson (9).

El P total de los suelos se determinó por fusión con Na_2CO_3 , como es descripto por Jackson (14).

Los restantes datos que se exhiben en el cuadro fueron tomados de los archivos de la Dirección de Suelos y Fertilizantes. Los métodos de Laboratorio usados por esa Dirección para la determinación de cada uno de ellos son los que se describen en el Tomo 1 de "Clasificación de Suelos - Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay" (M.A.P.-1976)

Posteriormente, para incluir en los análisis de regresión y correlación fueron calculados los siguientes parámetros como se detalla:

- Al intercambiable se expresó como porcentaje de las bases totales (meq) más el Al inter cambiabile (meq); es decir

$$\% \text{ Al} = \frac{\text{Al int. (meq)}}{\text{Bt(meq) + Al int (meq)}} \times 100$$

- La relación %Fe₂O₃ libres/ % Arcilla.
- C.I.C. de arcilla. Para determinarla se estimó en cada suelo el aporte de la materia orgánica a la C.I.C. total. Por diferencia se calculó el aporte de la arcilla. Luego, teniendo en cuenta el % de arcilla del suelo, se calculó la C.I.C. de la arcilla en meq/100 grs. de arcilla. Estos cálculos se pueden resumir mediante la siguiente fórmula:

$$\text{CIC arcilla} = \frac{\text{CIC suelo} - (\text{K} \times \% \text{ Mat.Org.})}{\% \text{ Arcilla}} \times 100$$

Siendo K la capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica.

Se usaron valores de K variables según el gran grupo de suelos, en base a la investigación realizada por Víctora y Zamalvide (1972).

Experimento de Adsonción

De cada suelo se tomaron 8 muestras de 2,5 gr. cada una y fueron puestas en tubos de centrífuga de 50 ml. A cada tubo se le agregó 25 ml. de una solución de Ca(H₂PO₄)₂ en Cl₂Ca 0,01 M.

Las concentraciones de las soluciones de P fueron respectivamente de: 0,5,10,15,25,40,60 y 100 ppm de P. Estas concentraciones equivalen a agregados de: 0,50,100,150,250,400,600 y 1000 µg de P/ gr. suelo.

Los suelos así acondicionados se equilibraron con las soluciones de P durante 18 horas, en un agitador recíproco. No se contó con medios para mantener la temperatura constante. No obstante esto, el motor del agitador permanentemente encendido ayudó a uniformizar algo la temperatura del ensayo. De esta forma la temperatura fue siempre superior a la ambiental, y el promedio para todo el ensayo se situó en 24°C. Las oscilaciones registradas estuvieron comprendidas dentro de un rango que fue de 21,5°C a 26,5°C.

Luego de las 18 horas de agitación, los suelos fueron centrifugados a 4000 r.p.m. por espacio de 15 minutos.

Del sobrenadante separado, se tomaron alícuotas que eran diluídas convenientemente para determinar en ellas el P remanente. La determinación de P en la solución fue hecha por el método de sulfomolibdato de amonio reducido con cloruro estannoso descrito por Jackson (14).

Las determinaciones de P en solución se hicieron por duplicado y se promediaron las lecturas.

En las pruebas previas al ensayo se hicieron repeticiones del experimento para algunos suelos. Se consideró que las diferencias encontradas no justificaban el hacer por duplicado cada punto de la isoterma.

Tampoco se consideró necesario el agregado de tolueno, puesto que la actividad microbiana no podía ser importante en muestras de suelos sacadas mucho tiempo atrás como eran estas.

El P fijado por la muestra de suelo era calculado como la diferencia entre el P inicialmente presente en la solución y el P remanente luego del equilibrio.

Con los datos de P fijado en p.p.m. y P remanente en solución, también en p.p.m., se construyeron las isothermas de adsorción según los distintos modelos propuestos.

En la construcción de las isotermas se despreció el P inicialmente presente en el suelo, y el P fijado se consideró como P en la fase sólida del mismo.

El ajuste de las isotermas se realizó mediante métodos estadísticos, usando una computadora Olivetti programa 101, debidamente programada.

A partir de los modelos se construyeron varios índices de fijación.

Con el objetivo de encontrar una explicación causal de la fijación, se correlacionaron dichos índices con propiedades del suelo. Estas correlaciones también fueron hechas por computación.

Por último se escogieron 6 suelos contrastantes con los cuales se repitió el ensayo de adsorción variando únicamente el tiempo de contacto entre las muestras de suelo y la solución de P . Para estos 6 suelos se empleó un tiempo de equilibrio de 6 días, (tal como propusieron Kamprath y Fox), agitando las suspensiones de suelo sólo dos veces al día por espacio de 30 minutos cada vez.

El tratamiento de los datos surgidos de este ensayo fue similar al dado a los datos del ensayo central.

Cuadro 2

SUELO	Ej. de Unidad Cartograf.	Clasificación	Material Madre	Trans.	Relac. Ac.B/Ac.A	TEXTURA				Clas.
						Arena	Limo	Arcilla	F.A.	
1	La Galina	Brunosol éutrico	crystalino	clara	1,7	24,8	43,7	34,5	F.A.	
2	Algorta	Planosol distico ócrico	Areniscas con cemento arcilloso	clara	3,8	79,6	11,2	9,2	Ar. F.	
3	Fraile Muerto	Brunosol éutrico típico	Fraile Muerto	clara	1,7	11,4	48,3	40,3	Ar. F.A.	
4	Tacuarembó	Luvisol melanico albico	Areniscas de Tacuarembó	clara	2,7	25,2	10,3	14,5	F.A.	
5	Rivera (asociado)	Acrisol ócrico albico	Areniscas de Tacuarembó	clara a abrup.	4,0	80,7	7,5	11,8	F.A. Ar.	
6	San Gabriel Guaycurú	Brunosol distico haplico	Granito	discon.	-	72,8	13,2	14,0	F.A.	
7	Cuchilla Corralito	Brunosol subéutrico lúvico	Sedimentos cuaternarios	clara	2,2	66,7	12,3	21,0	F.A. Ar.	
8	Cañada Nieto	Brunosol subéutrico típico	Fray Bentos arenoso	gradual	1,9	61,7	17,7	20,6	F.A. Ar.	
9	Lazcano	Brunosol subéutrico típico	Lodolita arcilla limosa calcarea	clara a abrup.	1,9	22,4	51,8	25,8	F.A.	
10	Chapicvi	Brunosol subéutrico típico	Arenisca ferruginosa F. Guichón	gradual	1,5	78,2	3,6	18,2	F. Ar.	
11	Las Toscas	Luvisol ócrico típico	Coluviones de las arenas	clara	5,4	86,4	6,2	7,4	Ar. F.	
12	Trinidad	Vertisol ruptico lúvico	Lodolita con arena sobre cret.	gradual	1,4	43,4	26,5	30,1	F. Ar. F. Arc. Ar.	
13	Tacuarembó	Luvisol ócrico abruptico	Areniscas de Tacuarembó	gradual	2,5	76,4	12,8	10,8	F. Ar. Ar. F.	
14	Fray Bentos	Brunosol éutrico típico	Fray Bentos	gradual	1,5	19,3	49,7	31,0	F. Ar. L. Fr. Arc.	
15	Paso Coelho	Vertisol haplico	Sedimentos líticos grises	discon.	1,3	12,7	45,9	41,4	Ar. L.	
16	Toledo	Brunosol subéutrico lúvico	Libertad con arena fina	clara	1,6	13,4	59,0	27,6	F. Ar. L. F. L.	
17	Itapebí	Litosol éutrico melanico	Basalto	-	-	7,8	49,1	43,1	Ar. L. F. Arc. L.	
18	Itapebí	Brunosol éutrico típico	Sedimentos de la F. Fray Bentos	clara	1,5	30,7	31,4	37,9	F. Arc.	
19	Itapebí	Vertisol típico	Litosol calcareo	-	-	8,6	44,3	50,1	Ar. L.	

Características de los Suelos usados

pH (agua)	% M.O.	% Fe ₂ O ₃	COMPLEJO de INTERCAMBIO meq./100g Suelo			% Sat. (pH 7)	P dispon. (PPM)	FRACCIONAMIENTO			P Total (PPM)	PARAM. CALCULADOS		
			Bases Tot.	Al	C.I.C. (pH 7)			P-Al (PPM)	P-Fe (PPM)	P-Ca (PPM)		% Al	C.I.C. Arcilla	% Fe ₂ O ₃ Arc.
6,07	5,78	1,0	21,9	-	27,1	80,8	2,17	18,3	30,6	10,7	313,2	-	44,9	0,03
6,0	1,77	0,40	4,8	-	6,5	73,8	3,7	5,2	10,4	1,2	117,0	-	51,1	0,04
5,8	4,81	0,77	16,4	-	23,4	70,1	13	9,7	24,4	4,5	273,6	-	34,2	0,02
5,6	2,1	0,80	3,5	0,2	6,1	57,4	4,7				136,8	5,4	27,6	0,05
5,8	0,88	0,77	1,5	0,4	2,9	60,0	2,7	3,4	9,8	5,3	115,2	21,0	16,9	0,06
6,1	2,14	0,86	5,4	-	7,4	73,0	3,7	13,9	17,2	6,2	153,0	-	30,3	0,06
5,8	3,41	0,39	11,0	-	13,8	79,7	2,2	10,5	14,9	4,5	190,8	-	33,3	0,02
7,2	4,43	0,36	18,8	-	18,8	100	2,4				237,6	-	48,5	0,02
6,2	5,88	1,1	17,2	-	18,7	92	3,2	15,7	23,5	9,5	262,8	-	26,7	0,04
5,9	2,48	1,0	8,7	-	11,2	77,7	0,28	10,5	10,4	1,5	151,2	-	40,9	0,05
6,2	0,90	0,35	2,3	-	2,8	82,1	2,4	5,2	14,9	11,3	90,0	-	25,7	0,05
5,9	5,29	0,25	20,0	-	22,6	88,5	8,0	22,0	26,8	9,5	252,0	-	39,9	0,01
5,2	1,98	0,42	3,7	0,8	6,9	53,6	1,75	13,1	15,8	2,4	111,6	17,8	45,4	0,04
6,5	5,53	0,29	25,3	-	27,3	92,7	9,1	23,1	19,0	11,0	288,0	-	43,7	0,01
5,5	7,5	0,8	34,8	-	42,5	81,9	3,4	30,1	29,1	5,9	396,0	-	66,4	0,02
6,2	2,15	1,0	15,3	-	16,4	93,3	12	18,9	41,6	6,4	194,4	-	43,5	0,04
6,1	7,04	2,5	37,4	-	41,9	89,3	3,65	19,6	28,9	20,8	363,6	-	72,8	0,06
6,5	6,9	0,66	37,1	-	38,8	95,6	5,5	32,7	18,7	17,8	399,6	-	56,9	0,02
6,5	6,85	2,1	48,0	-	51,4	93,4	4,1	18,9	22,3	18,7	345,6	-	82,2	0,04

Cuadro - continuación -

Unidad Cartograf.	Clasificación	Material Madre	Trans.	Relac. Ac. B / Ac. A	TEXTUR			Sis. Arc.	pH (agua)	% M.O.	% Fe ₂ O ₃	COMPLEJO de Intercambio meq. / 100g. Suelo			% Sat. (pH 7)	P dispon. (ppm)	FRACCIONAMIENTO			P Total (ppm)	ANAL. CALCULADOS.				
					Arena	Limo	Arcilla					Bases Tot.	Al	C.I.C (pH 7)			P-Al (ppm)	P-Fe (ppm)	P-Ca (ppm)		% Al	C.I.C. Arcilla	% Fe ₂ O ₃ / % Arc.		
0	Arroyo Hospital	Brunosol subéutrico lúvico	Yaguari	abrupto	1,8	31,9	36,8	31,3	F. Arc.	5,5	4,4	0,85	14,4	-	18,4	78,3	2,6	28,8	29,7	15,5	378	-	30,7	0,03	
1	Riso	Vertisol ruptico típico	Lodolita F. Libertad	-	-	25,4	32,1	42,5	Arc.	7,0	8,0	0,52	44,0	-	44,0	100	3,1	27,5	14,3	12,8	349,2	-	65,9	0,01	
2	Tala Rodríguez	Vertisol ruptico lúvico	Lodolita Cuaternaria	clara	1,3	20,0	44,8	35,2	F. Arc. L	6,7	3,3	1,14	26,3	-	27,4	96,0	1,7	15,2	8,6	9,5	172,8	-	59,1	0,04	
3	Cuchilla de Haedo	Litosol éutrico melánico	Basalto	-	-	21,0	45,4	33,6	F. Arc. L	6,1	4,4	4,6	22,9	-	26,5	86,4	2,6	13,6	32,7	27,9	435,6	-	65,8	0,14	
4	Itapebi	Litosol éutrico melánico	Basalto	-	-	14,9	41,0	44,1	F. Arc. L	6,2	6,0	3,3	37,4	-	42,9	87,2	2,88	18,3	20,8	15,5	316,8	-	76,9	0,07	
5	La Carolina	Brunosol éutrico lúvico	Lodolita	-	2,1	22,7	50,3	27	F. L.F. Arc. L	6,5	5,5	1,0	16,4	-	19,0	86,3	2,8	15,7	12,8	6,5	208,8	-	29,6	0,04	
6	Cuchilla de Haedo	Litosol éutrico melánico	Basalto	-	-	26,3	39,1	34,6	F. Arc.	6,1	4,9	5,7	19,0	-	25,9	73,3	1,92	10,5	35,4	21,4	493,2	-	60,7	0,16	
7	Sierra de Palenque	Inceptisol Umbrico	Basamento cristalino	clara (B)	-	54,4	21,9	23,7	F. Arc. Ar.	4,5	3,73	1,42	3,0	1,9	11,2	26,8	4,0	9,2	23,8	0,30	194,4	38,8	23,8	0,06	
8	Colonia Palma	Brunosol subéutrico típico	Lodolita Cuaternaria arenosa	clara	0,5	60,8	19,4	19,8	F. Arc. L	5,5	2,33	0,88	13,3	-	16,3	81,6	4,0	12,3	11,9	7,1	140,4	-	59,1	0,04	
9	Libertad	Brunosol éutrico típico	Libertad	clara	1,6	21,6	45,4	33,0	F. Arc. L	6,6	5,23	0,8	22,9	-	23,4	97,9	40,0	64,6	89,2	32,1	439,2	-	39,4	0,02*	
0	Aparicio Saravia	Luvisol umbrico abrupto	Devónico	clara	2,2	51,2	24,6	24,2	F. Arc. Ar.	5,3	2,59	0,83	3,4	0,9	6,9	49,3	1,2	8,6	11,0	4,5	194,4	20,9	14,4	0,03	
1	San Gabriel Guaycurú	Brunosol subéutrico típico	Amfibolita	clara	1,9	54,8	20,2	25,5	F. Arc. Ar.	5,5	3,79	1,92	11,2	-	15,9	70,4	2,5	13,1	18,4	14,9	273,6	-	33,2	0,08	
2	Lachar. queada	Solod	Limos Cuaternario	grada	1,9	13,3	62,5	24,2	F. L	5,5	3,31	0,8	12,5	-	14,9	83,9	6	9,96	23,2	8,0	223,2	-	34,3	0,03	
3	San Luis	Gleysol lúvico melánico típico	Arcilla de la Fr. San Luis	grada	1,7	5,5	66,5	28,8	F. Arc. L	5,4	9,31	0,4	24,9	-	30	68		34,1	36,9	20,8	338,4	-	40,7	0,01	
4	Lazcano	Planosol subéutrico melánico	Sedimentos	abrupto	2,0	24	52,2	23,8	F. L	5,6	4,15	0,43	10,6	-	14	75,7		3,5	20,7	29,1	5,9	284,4	-	33,0	0,02
5	Espinillar	Brunosol éutrico típico	Lodolita asociada a Fray Bentos			47,3	23,0	29,7	F. Arc. Ar.	5,3	3,7	0,6	19,3	-	23	83,9		5,0	15,5	1,5	7,4	309,6	-	52,5	0,02
6	San Manuel	Brunosol éutrico Háptico	Fray Bentos	grada	1,2	29,8	28,2	42,4	Arc.	7,5	7,96	0,9	37,3	-	37,3	100		5,2	33,0	2,9	31,2	421,2	-	41,2	0,02
7	Río Branco	Planosol distico óxico	Sedim. arenoso arcillosos de F. Salinas	abrupto	4,3	44,8	45	10,2	F.	5,0	2,0	0,0	4,1	0,2	8,5	52		1,1	12,3	7,7	1,5	108,0	4,3	52,4	0,0
8	Río Branco	Planosol distico óxico	Sedim. arenoso arcillosos de F. Salinas	abrupto	2,8	48,7	35,1	15,8	F. Arc.	4,9	2,24	0,0	5,4	0,1	8,5	64		3,2	8,9	5,6	2,7	129,6	1,8	32,9	0,0
9	Sierra de Palenque	Brunosol éutrico típico. Fray Bentos y mod. profunda.	Escleritas	clara	1,5	24,1	34,7	34,9	F. Arc.	5,7	7,76	3,9	12,5	-	19,0	50		2,5	11,8	9,5	4,5	270	-	9,7	0,01

C A P I T U L O 3

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 - Isotermas de adsorción

En la figura 7 se graficaron las isotermas de cuatro suelos, en escala lineal. Los suelos incluidos son dos extremos y dos intermedios, demostrando la variación encontrada en la totalidad de los suelos estudiados.

Se ubicaron los puntos experimentales, y luego se ajustó gráficamente una curva para evidenciar la tendencia general. Puede apreciarse que esta tendencia es similar a la encontrada por varios investigadores.

Es decir que la curva va disminuyendo su pendiente y aproximándose a un máximo, sin llegar a ser asintótica.

La interpretación de este hecho involucraría dos fenómenos: por un lado la paulatina saturación del complejo adsorbente y consecuente disminución de la fijación; por otro, un cambio en los mecanismos implicados en la fijación a determinadas concentraciones de P en la solución.

Con el objetivo de encontrar alguna relación lineal entre el P adsorbido y la concentración de P en la solución en equilibrio, se procedió a graficar las isotermas en escala semilogarítmica (fig. 8).

Como puede verse, no se obtuvo una única relación lineal sino curvas con una clara inflección que permitiría descomponerlas en dos rectas. Esta inflección estaría mostrando el cambio de los mecanismos de adsorción intervinientes.

3.2 - Indíces de Fijación propuestos

Con el objetivo de obtener índices que caractericen la fijación de P se ajustaron distintos mo
delos a los datos experimentales.

En primer lugar se usó la ecuación de Langmuir. En el cuadro 3 se exponen las ecuaciones obteni
das así como los valores de b (máximo de adsor
ción) y K (energía de retención) para cada sue
lo. La figura 9 muestra la isoterma de Langmuir de 4 suelos y los puntos experimentales sobre
puestos.

El ajuste del modelo a los datos fue satisfacto
rio, y esto puede verse a través de los valores de los coeficientes de correlación. Estos coefi
cientes estuvieron comprendidos entre 0,948 y 0,997, con una media de 0,983 (cuadro 3).

Posteriormente se usó la ecuación de Freundlich. En el cuadro 4 pueden verse las ecuaciones corres
pondientes a cada suelo, en su forma lineal. También el valor de la constante a. En la figura
10 se graficaron para los suelos números 11, 29, 31 y 27 estas isotermas en escala logarítmica.

Este modelo fue el que presentó el mejor ajuste a los datos. Los coeficientes de correlación os
cilaron entre 0,983 y 0,999, siendo su media de 0,995.

Si bien el ajuste de estos dos modelos fue bueno, se entendió que daban el mismo peso a todos los puntos experimentales, sin contemplar las dos
tendencias que las isotermas presentan a bajas
y altas concentraciones en solución respectiva
mente (figuras 7 y 8).

La tendencia a bajas concentraciones es más im
portantes a los efectos prácticos, porque de al
guna manera está reflejando lo que sucede normal
mente en la realidad del suelo. Por esta razón
se creyó conveniente ajustar un modelo que pre

cisamente contemplara esta parte de la isoterma. Esto fue realizado calculando la recta de regresión lineal del P adsorbido versus el logaritmo de la concentración de P en la solución, en base a tres puntos. Los tres puntos experimentales seleccionados para cada suelo, eran aquellos que se encontraban en torno a 1 ppm de P en solución.

En el cuadro 5 se muestran las ecuaciones obtenidas y en la figura 11 se grafican los 4 suelos usados como ejemplo.

El ajuste de esta recta también fue bueno. Los r oscilaron entre 0,904 y 0,999 con una media de 0,988.

A partir de estos tres modelos se determinaron 5 posibles índices de la fijación. Estos fueron los siguientes:

- *Índice I*: es la cantidad de P adsorbido por el suelo para mantener una concentración de 1 ppm de P en la solución, calculado a partir de la recta ajustada en base a tres puntos. El valor numérico de este índice coincide con el intercepto de la ecuación.

Se considera que hubiera sido más adecuado calcular el P adsorbido a una concentración en solución de 0,2 ppm. como fue sugerido por varios autores. Sin embargo, se optó por la concentración de 1 ppm por tres razones: a) no se obtuvieron datos experimentales en torno a esta concentración en los suelos menos fijadores;

b) los puntos de las concentraciones más bajas se consideran afectados de cierto error por dificultades en la determinación del P.

c) el P presente en la fase sólida del suelo con anterioridad al ensayo, pasa a tener una importancia considerable a tan bajas concentraciones, y no sería posible despreciarlo como se hizo.

- *Índice II*: máximo de adsorción calculado a partir de la isoterma de Langmuir (b).
- *Índice III*: energía de adsorción de Langmuir (K)
- *Índice IV*: P en fase sólida para mantener 1 ppm de P en solución, calculado a partir de la isoterma de Langmuir.
- *Índice V*: P en fase sólida para mantener 1 ppm de P en solución calculado a partir de la isoterma de Freundlich. El valor de este índice coincide con el valor de la constante a.

En el cuadro 6 se exponen todos estos índices para cada uno de los suelos.

Con el objetivo de determinar si los 5 índices evaluaban cosas semejantes, se procedió a estudiar la correlación que entre ellos existía. El cuadro 7 presenta los coeficientes de correlación hallados.

En términos generales los índices tienen buena correlación entre sí, no obstante pueden verse algunas diferencias. Las mejores correlaciones las presentan los índices I, III, IV y V. Los índices I y V en particular, presentan el coeficiente de correlación más alto, por lo que se interpreta que el modelo de Freundlich, a pesar de ser ajustado con todos los puntos, contempla las tendencias de la fijación a las concentraciones de P más bajas.

En conclusión, excepto el índice II, el resto de los índices estarían evaluando la misma característica.

Se interpreta que el máximo de adsorción de Langmuir está reflejando la adsorción de P que ocurre a concentraciones de P en solución más alta.

En consecuencia, se seleccionaron dos índices para ser correlacionados con las propiedades de los suelos. Estos fueron el I y II.

3.3 - Influencia del tiempo de equilibrio sobre los Índices de Fijación

Con el objetivo de evaluar la influencia del tiempo de equilibrio entre el suelo y las soluciones de P, sobre los índices de fijación, se procedió a realizar un ensayo de adsorción donde se varió solamente este factor.

El tiempo de equilibrio usado fué de 6 días, en lugar de las 18 horas.

En la figura 12 se presentan las isotermas determinadas con 18 horas y 6 días de equilibrio respectivamente para 3 suelos. Ver también cuadro 8.

Puede apreciarse que la fijación de P se incrementa con el tiempo. Este incremento es mayor a altas concentraciones de P ofrecido. Esto es lógico puesto que cuando se ofrecen soluciones con poco P, el suelo lo retiene casi todo, y el aumento del tiempo de contacto no producirá incrementos importantes en la cantidad fijada. Por el contrario, si la concentración de P en la solución es alta, en un lapso pequeño el suelo retendrá sólo una parte del mismo, y el aumento del tiempo de reacción le dará oportunidad de incrementar la adsorción en un porcentaje importante ya que entran a actuar mecanismos de acción más lenta.

No obstante esto, las tendencias de las isotermas de un mismo suelo se mantienen, conservándose además las relaciones generales entre los suelos.

Esto se ve reflejado en las altas correlaciones encontradas entre los índices de fijación determinados a 18 horas y 6 días respectivamente (cuadro 9).

El índice más afectado por la variación del tiempo (r más bajo) fue el II. Esto es lógico ya que el tiempo tendrá mayor influencia sobre los máximos de adsorción que alcancen los suelos. Por lo tanto, los suelos se diferenciarán más en el máximo con tiempos de equilibrio más prolongados.

El incremento porcentual promedio de los índices fué de 44%. A pesar de este hecho, a los efectos de comparar las capacidades de fijación de distintos suelos, parecería que el tiempo de reacción ← no es de mucha importancia (siempre que se uniformice dentro de un mismo ensayo), dado los altos y significativos coeficientes de correlación que existen entre los índices determinados a distintos tiempos de reacción.

3.4 - Correlaciones entre Índices de Fijación y Propiedades del Suelo

El objetivo de correlacionar los índices de fijación con propiedades del suelo, es el de determinar cuales de estas hacen su mayor aporte a la fijación; y a su vez, posteriormente, inferir las características de fijación de los suelos a partir del conocimiento de esas propiedades.

En el cuadro 10 se presentan los resultados de las correlaciones con los Índices I y II. Se escogieron estos índices por reflejar, como ya fue dicho, el primero las características de fijación a concentraciones de P bajas, y el segundo por que en globa también lo que ocurre a altas concentraciones.

Se correlacionó cada índice con cada variable en forma individual, y luego se hicieron correlaciones dobles donde se incluyeron como variables el % de arcilla y cada una de las otras propiedades por vez.

- % Arcilla - en concordancia con resultados de otras investigaciones, el % de arcilla de los suelos tuvo una correlación alta y significativa al 1% con ambos índices. Este factor explicó el 29% de la variación del Índice I, y el 38% del Índice II.
- Oxidos de Fe Libres - el % de Fe_2O_3 de los suelos fue el factor que en forma individual explicó la mayor parte de la variación de los índices: alrededor del 45%.

Si bien los óxidos de Fe han sido identificados como uno de los mecanismos fijadores de P, ésta alta correlación encontrada no puede ser atribuida en su totalidad a la acción propia de estos, puesto que presentan al mismo tiempo una asociación considerable con la arcilla ($r=0,42$). Esto se pone en evidencia al realizar las correlaciones dobles ya que el coeficiente de determinación (r^2) no sufre el incremento que sería de esperar si las variables fueran independientes. Es decir, para el Índice I la arcilla y los óxidos de Fe explican en forma individual el 29% y el 46% de la variación respectivamente; mientras que los dos factores conjuntamente explican el 54%.

- % Al intercambiable - la correlación de este factor fue significativa sólo para el Índice I. Esto podría interpretarse como que este mecanismo de fijación actúa predominantemente cuando las concentraciones de P en la solución son bajas.

Cabe señalar que el porcentaje de aluminio, aparte de reflejar la presencia de este mecanismo, es un índice de suelos más meteorizados y por tanto con arcillas tipo 1-1.

El aluminio al ser incorporado a la correlación doble, provoca un incremento considerable del coeficiente de determinación, lo que concuerda con la baja y negativa relación encontrada entre arcilla y aluminio. O sea que el 11% de la variación del Índice I explicado por el % Al intercambiable individualmente es atribuible a este factor en forma independiente de la arcilla.

La importancia del Al como mecanismo de fijación ha sido ampliamente demostrada por numerosos trabajos. De acuerdo con esto era de esperar un r^2 mayor que el encontrado. Sin embargo, cabe hacer notar que de los 39 suelos estudiados, sólo 7 presentan efectivamente Al intercambiable, lo cual deprime el valor del coeficiente (r^2).

A la luz de estas interpretaciones, se procedió a correlacionar el Índice I con el % Al intercambiable, excluyendo del análisis los suelos que no lo poseen. De esta forma se evidenció más aún la importancia de este factor, puesto que se encontró un coeficiente de determinación de $r^2 = 0,75$.

Se realizó también la correlación del mismo Índice, pero directamente con los miliequivalentes de Al intercambiable de los 7 suelos, en vez de usar el % Al. En este caso el r^2 alcanzó el valor de 0,90.

Dada la importancia del % Al y Fe_2O_3 , se hizo una correlación doble del Índice I con estas dos variables, considerando los 39 suelos. Las dos propiedades explicaron en forma conjunta el 61% de la variación de la fijación ($r^2 = 0,61$).

Si bien el Al intercambiable es, en consecuencia, un factor importante para explicar la fijación de P, el porcentaje de suelos que tienen Al es relativamente bajo. Esto determina que la variación en las capacidades de fijación de la mayoría de nuestros suelos, viene dada por otras variables distintas del Al.

- $\frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3}{\% \text{arcilla}}$ - este parámetro fue construido con la intención de mejorar el poder predictivo del $\%$ arcilla, puesto que tiene en cuenta el contenido de óxidos de esa arcilla. Refleja suelos más degradados y con arcillas de tipo 1:1.

La relación mostró una alta y significativa correlación con los índices de fijación. No está correlacionada sin embargo con el $\%$ arcilla pero sí con los óxidos de Fe libres ($r^2 = 0,9$), por lo cual el parámetro está reflejando el efecto de los óxidos de Fe independizados de la arcilla. Por esta razón, al ser incluido en las correlaciones dobles produjo prácticamente el mismo incremento del r^2 que produjeron los óxidos de Fe.

- Materia Orgánica - en general la materia orgánica mostró correlación con la fijación. Los coeficientes de regresión obtenidos en las regresiones simples fueron positivos. Sin embargo, la materia orgánica tiene una asociación muy pronunciada con el $\%$ arcilla ($r = 0,81$), por lo cual su efecto puede ser enmascarado por ésta.

Al incluir las dos variables (M.O. y arcilla), en el análisis de regresión, se comprueba que esto es realmente así, puesto que los coeficientes de regresión para la materia orgánica pasan a ser negativos.

En conclusión, estos resultados podrían tomarse como evidencia de que la M.O. tiene un efecto depresor sobre la fijación, concordando con lo sostenido por varios autores. Sin embargo, hay que tener en cuenta, que al variar la M.O. en los suelos están variando también muchas otras propiedades físico-químicas de los mismos, y en definitiva está variando el tipo de suelo. En ese sentido altos contenidos de M.O. están asociados a suelos menos meteorizados, y por lo tanto con menor capacidad de fijación por unidad de arcilla (predominan arcillas tipo 2:1).

- pH - las correlaciones de la fijación con el pH no fueron significativas; a pesar de ello, en las correlaciones dobles los coeficientes de regresión, para el pH mostraron signos negativos de acuerdo a lo esperado. Es decir: a menor pH, suelos más lixiviados y por ende mayor fijación.

- C.I.C. de arcilla - este parámetro se calculó en forma estimativa con la intención de tener un indicador del tipo de arcilla. Con la disminución de la C.I.C. de la arcilla, el tipo predominante sería la caolinita (arcilla 1:1).

Las correlaciones encontradas de este factor con los índices no fueron significativas, pero se entiende que la estimación del parámetro no fue lo suficientemente precisa.

A pesar de estas dificultades, el coeficiente de regresión para la C.I.C. de la arcilla en las correlaciones dobles fue negativo, concordando con lo que era de esperar.

Interpretación de la acción conjunta de varios mecanismos de fijación

En la figura 13 se graficó la recta de regresión del Índice I vs. el % arcilla, y se ubicaron los suelos para visualizar y analizar la dispersión.

Como ya había sido comentado, puede verse que existe una buena relación entre la fijación y el % arcilla. No obstante, algunos suelos se apartan bastante de la tendencia general, fijando mayor o menor cantidad de P que la esperada por su contenido de arcilla.

Los suelos que se apartan fijando mayores cantidades de P en general presentan cantidades destacables de Al intercambiable y/o óxidos de Fe libres.

La aumentada fijación de los suelos 13 y 30 puede explicarse por altos contenidos de Al; mientras que la de los suelos 23, 24, 26, 31 y 39 se explica por óxidos de Fe (relación % Fe_2O_3 / % arcilla, entre 0,07 y 0,16).

El suelo 27 es el de mayor fijación, y presenta contenidos altos tanto de Al como de óxidos de Fe.

Todos estos suelos presentan en general % M.O. por debajo del promedio o cercano a este. Como excepción, pueden citarse los suelos 24 y 39, con 6% y 7,8% de M.O. respectivamente (por lo que cabría esperar una depresión de la fijación), pero los altos contenidos de óxidos de Fe determinan sus características de suelos muy fijadores.

Los suelos 17 y 19 son otro caso donde se presentarían efectos contrapuestos de los óxidos y la M.O., sin embargo, en ellos estos efectos estarían equilibrados por lo que su fijación finalmente es determinada por otro factor: el % arcilla.

En el extremo opuesto, los suelos que fijan menos de lo esperado, de acuerdo a su contenido de arcilla, en general no presentan Al y tienen muy bajos contenidos de óxidos de Fe.

Pero las características comunes que explicarían específicamente su menor capacidad de fijación son: la baja relación % Fe_2O_3 / % arcilla y el alto contenido de M.O. La primera oscila entre valores de 0,01 y 0,02, y sería evidencia de la presencia de arcillas tipo 2:1 (menos fijadoras que la tipo 1:1). La M.O., de acuerdo con su efecto más ampliamente aceptado actuaría deprimiendo la fijación y/o indicaría suelos menos degradados.

Los suelos 12, 14, 18, 21, 29, 33, 34 y 36 son los que presentan las características comentadas. El suelo 29 adicionalmente, tiene la particularidad de haber recibido una fertilización previa importante (posee 40 ppm de P disponible; cuadro 2), lo que de por sí influye en reducir la fijación. O mejor dicho, ese suelo tiene mayor cantidad de P en la fase sólida para mantener una concentración dada de P en solución, que aquella que se le atribuye a partir de la isoterma.

Análisis de Regresión y Correlación

Múltiples

Finalmente, con el objetivo de llegar a la determinación de un modelo de más de dos variables con el cual estimar la fijación, se realizó un análisis de regresión y correlación múltiple. El mismo fue hecho en el Centro de Computación de la Facultad de Ingeniería.

El programa empleado permitía que las distintas variables fueran incorporadas de a una, en orden de importancia según su aporte a la variación de los índices.

No se incluyó % Fe_2O_3 como una variable, y si la relación % Fe_2O_3 / % Arcilla por estar éste muy correlacionado con el primero y aportar además otro tipo de información.

En el cuadro 11 se muestran los sucesivos modelos, los coeficientes de correlación y de determinación, así como los valores de las "t" correspondientes a cada coeficiente de regresión, y la matriz de correlación entre las variables.

Como puede verse, los resultados obtenidos en este análisis confirman todo lo comentado respecto a la importancia y efecto de cada variable.

% Fe_2O_3 / % Arcilla y Al son las variables más importantes junto con la arcilla.

Cuando se incorpora al modelo una variable que está asociada a otra(s) ya presente(s), el valor de "t" del coeficiente de regresión de ésta disminuye, o sea que su significación decrece. Esto es porque parte de la variación que explicaba, pasa a ser explicada por la nueva variable incorporada. A su vez, el incremento que sufre el coeficiente de determinación (r^2) no es muy importante en estos casos.

Por ejemplo, puede verse que al incorporarse el pH al modelo, baja el "t" del coeficiente del %Al. La correlación entre las dos variables es de $r = 0,48$ (cuadro 11). También al entrar M.O., baja la significación del % arcilla (r entre variables $0,81$). Cuando entra CIC de arcilla disminuye la significación de % arcilla y de % Al (cuadro 11).

Por último, puede constatar que los incrementos obtenidos en el r^2 luego de incorporada la tercer variable, son de poca importancia. Se entiende por tanto que a efectos prácticos no se justificaría el uso de un modelo de más de tres variables, siendo estas: % arcilla, % Al y % Fe_2O_3 / % arcilla. Con esto se alcanza a explicar el 75% de la variación del Índice I.

3.5. Inferencia de la Capacidad de Fijación

3.5.1. Agrupamiento de los suelos según su capacidad de fijación, evaluada a través del Índice I

En el entendido de que los 39 suelos estudiados reflejan toda la variación de capacidades de fijación que se puede encontrar en R.O.U., se procedió a definir 3 categorías. Estas categorías agrupan suelos de baja, media y altas capacidades de fijación respectivamente, pero no en términos absolutos sino referido a lo que ocurre en los suelos de nuestro país.

A continuación se presentan los grupos, y los suelos de este estudio que quedan comprendidos en ellos.

CUADRO 12

<u>Grupo</u>	<u>Valor del Índice I</u>	<u>Suelos Comprendidos</u>
Baja fijación	0 a 60	2, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 28, 29, 33, 34 y 37
Media fijación	60 a 120	1, 4, 5, 6, 9, 13, 15, 16, 18, 21, 22, 25, 31, 32, 35, 36 y 38
Alta fijación	120 y más	3, 17, 19, 20, 23, 24, 26, 27, 30 y 39

Seguidamente se exponen los promedios y rangos de algunas características de los suelos comprendidos en cada uno de los grupos.

CUADRO 13

GRUPO	% Arcilla	% Fe ₂ O ₃ / % Arcilla	% Fe ₂ O ₃	Al (meq.)
Baja fijación	Media: 21,4	0,024	0,52	0,017
	Rango: 7,4-33	0-0,05	0-1,1	0 - 0,2
Media fijación	Media 27	0,035	0,86	0,088
	Rango: 10,8- 42,5	0 - 0,08	0-1,92	0-0,8
Alta fijación	Media: 36	0,072	2,59	0,28
	Rango: 23,7-50	0,02-0,16	0,77-5,7	0-1,9

Finalmente, puede afirmarse en términos generales, que el grupo de baja fijación comprende predominantemente planosoles, suelos arenosos, y praderas pardas máximas y medias de texturas más livianas y bajos contenidos de óxidos.

El grupo de mediana fijación comprende al grueso de los suelos con características intermedias, así como aquellos arenosos que poseen algún contenido de Al.

El grupo de alta comprende suelos de basalto, vertisoles, y en general los suelos de texturas más pesadas y/o de contenidos de óxidos de Fe y Al intercambiales más destacados.

3.5.2. Criterios para inferir la capacidad de fijación de P de los suelos

Uno de los objetivos con que se realizó este trabajo, fue el de lograr definir que parámetros del suelo eran más apropiados para predecir de forma rápida la capacidad de fijación de un suelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos, son 2 los criterios básicos que pueden ser usados en forma alternativa o conjunta:

- 1°) Una primera aproximación al conocimiento de la capacidad fijadora de un suelo, puede ser a través del tipo de suelo (definido a nivel de Gran Grupo), según lo visto en el punto 4.1.
- 2°) Un método más preciso es por vía de cuantificar determinadas propiedades del suelo y cotejarlas con los valores del cuadro 13.

En este sentido, la propiedad que demostró ser la que explicaba mayor parte de la fijación en forma individual fue el % Fe_2O_3 libre. Ella por sí sola puede ser usada para inferir; pero cuando el suelo posee Al intercambiable, éste debe ser tenido en cuenta.

Otra característica del suelo que puede utilizarse en adición a las anteriores, es el porcentaje de arcilla por la facilidad de su medición.

Más exacta será la determinación de la fijación si los valores que toman estas propiedades son sustituidos en las ecuaciones de regresión halladas, y se estima así el valor del Índice I correspondiente al suelo en estudio. Con este valor se ubica al suelo en algunos de los grupos de fijación, de acuerdo con el criterio expuesto en el cuadro 12.

Si se desea determinar el Índice I a través de una sola propiedad del suelo, se recomiendan las siguientes ecuaciones:

a) en forma general: Índice I = $56,8 + 32 \cdot x$

$$x = (\text{Fe}_2\text{O}_3) \quad r^2 = 0,46***$$

b) si existe Al int.: Índice I = 32,4 + 109,6 x

x = (Al meq/100 grs. suelo)

$$r^2 = 0,90***$$

c) por su facilidad de medición:

Índice I = 15,6 + 2,88 x

x = (% Arcilla)

$$r^2 = 0,29***$$

Para determinar el valor del Índice I a través de un modelo que incluya varias variables, y por tanto obtener una mayor confiabilidad, se recomienda la ecuación:

Índice I = -42,1 + 3,47 (% Arcilla) + 3,62 (% Al)

+ 756,4 (% Fe₂O₃/ % Arcilla)

$$r^2 = 0,75 ***$$

CONCLUSIONES

1. Los suelos del Uruguay mostraron diferencias importantes en cuanto a las relaciones fase sólida-solución en el equilibrio del P, evaluado por la técnica de las Isotermas. Diferentes suelos necesitan entre 19 y 249 ppm de P para mantener 1 ppm en la solución.
2. Los diferentes índices de fijación de P derivados de las experiencias realizadas, estuvieron altamente correlacionados entre sí. Dentro de estos altos valores de correlaciones, las más bajas se presentaron entre el máximo de la ecuación de Langmuir (b) y los índices estimados a bajos valores de concentración en la solución.
3. Los índices de capacidad de fijación de P estimados a partir de equilibrios de 6 días dieron valores consistentemente más altos (en promedio 44%), pero altamente correlacionados con los estimados en 18 horas.
4. Es posible hacer un agrupamiento primario de la capacidad de fijación de P de los suelos del Uruguay de acuerdo a su clasificación taxonómica. Las definiciones manejadas de baja, media y alta capacidad de fijación, no son en términos absolutos sino referidas a los valores encontrados en nuestro país.

Es de hacer notar que en este trabajo no se incluyeron repeticiones de suelos pertenecientes a cada unidad por lo cual no es posible conocer la consistencia de estos agrupamientos primarios.

5. Es posible estimar en forma aproximada la capacidad de fijación de P, midiendo otros parámetros del suelo. En este sentido la propiedad que por sí sola explica más la capacidad de fijación es el contenido de Fe_2O_3 libres. Alternativamente a esto, pero con menor capacidad de predicción podría usarse el contenido de arcilla.

En caso de poderse utilizar datos complementarios, sería importante utilizar el % de Al intercambiable en los suelos que lo posean.

Se considera importante para próximas etapas de trabajo continuar en dos líneas:

- a) *Completar este estudio incluyendo varias muestras de cada tipo de suelo a los efectos de evaluar la consistencia de las diferencias en tre unidades.*
 - b) *Evaluar la influencia de la capacidad de fijación de los suelos (estimadas a través de los índices de fijación) en la respuesta al fertilizante agregado, así como en el efecto residual de los fertilizantes. Todo esto en ensayos maceteros y de campo, y en lo posible a través de varios años.*
-

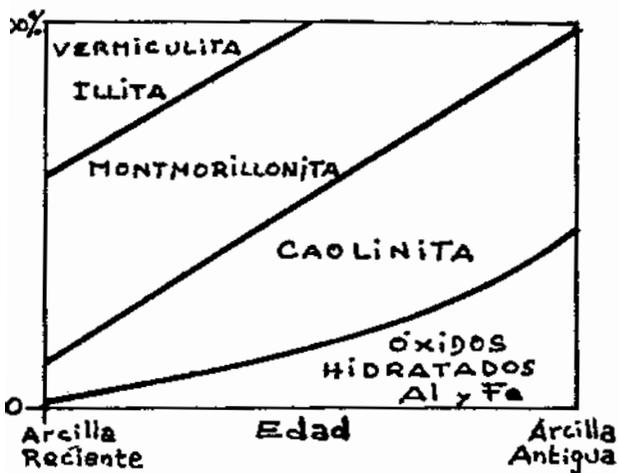


Figura 1: citada de JACKSON y SHERMAN (1953) por "Curso de Geología" Tomo I FAC. AGR.

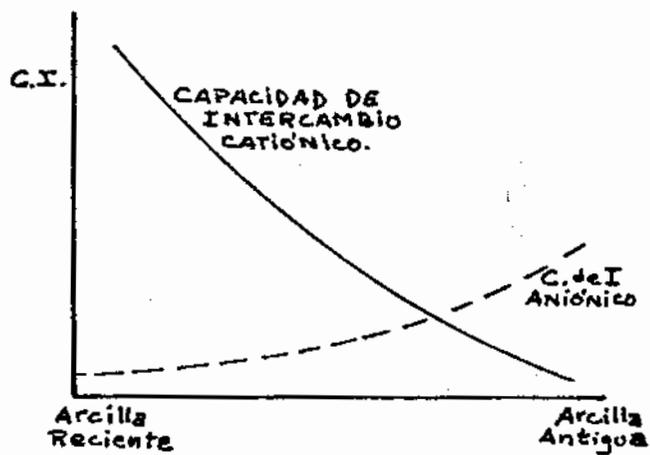


Figura 2: citada de JACKSON (1962) por "Curso de Geología" Tomo I FAC. AGR.



Figura 3: Tendencia general de las Isotermas Tomada de Ryden y Syars (1977)

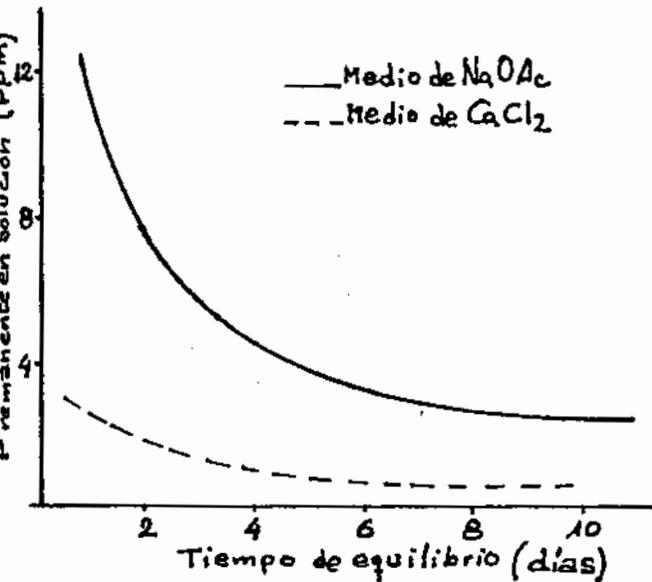


Figura 4: P remanente en Solución Luego del equilibrio. Tomada de Foxy Kamprath (1970)

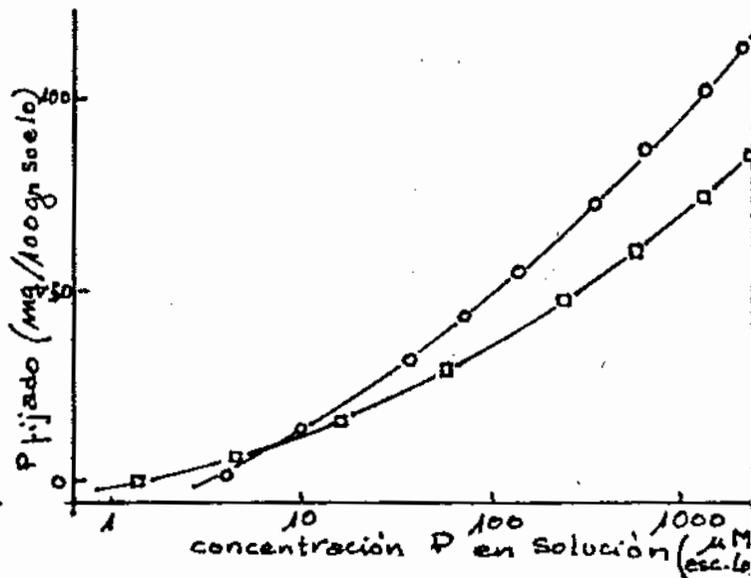


Figura 6: Isotermas de adsorción que se cruzan a bajas concentraciones Tomada de Bache y Williams (1974)

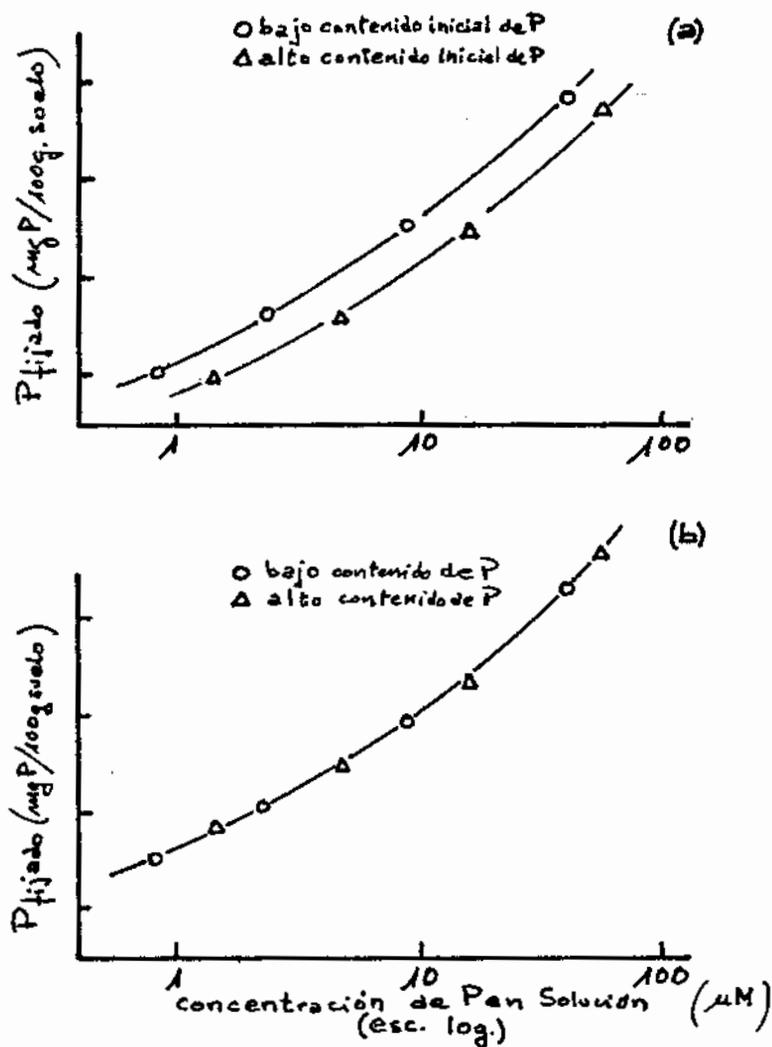


Figura 5: (a)- Isothermas de 2 muestras del mismo suelo, con bajo y alto contenido inicial de P nativo
(b)- Isotherma de ambas muestras, corregidas por el contenido de P nativo inicial
(Tomada de Bache y Williams 1971.)

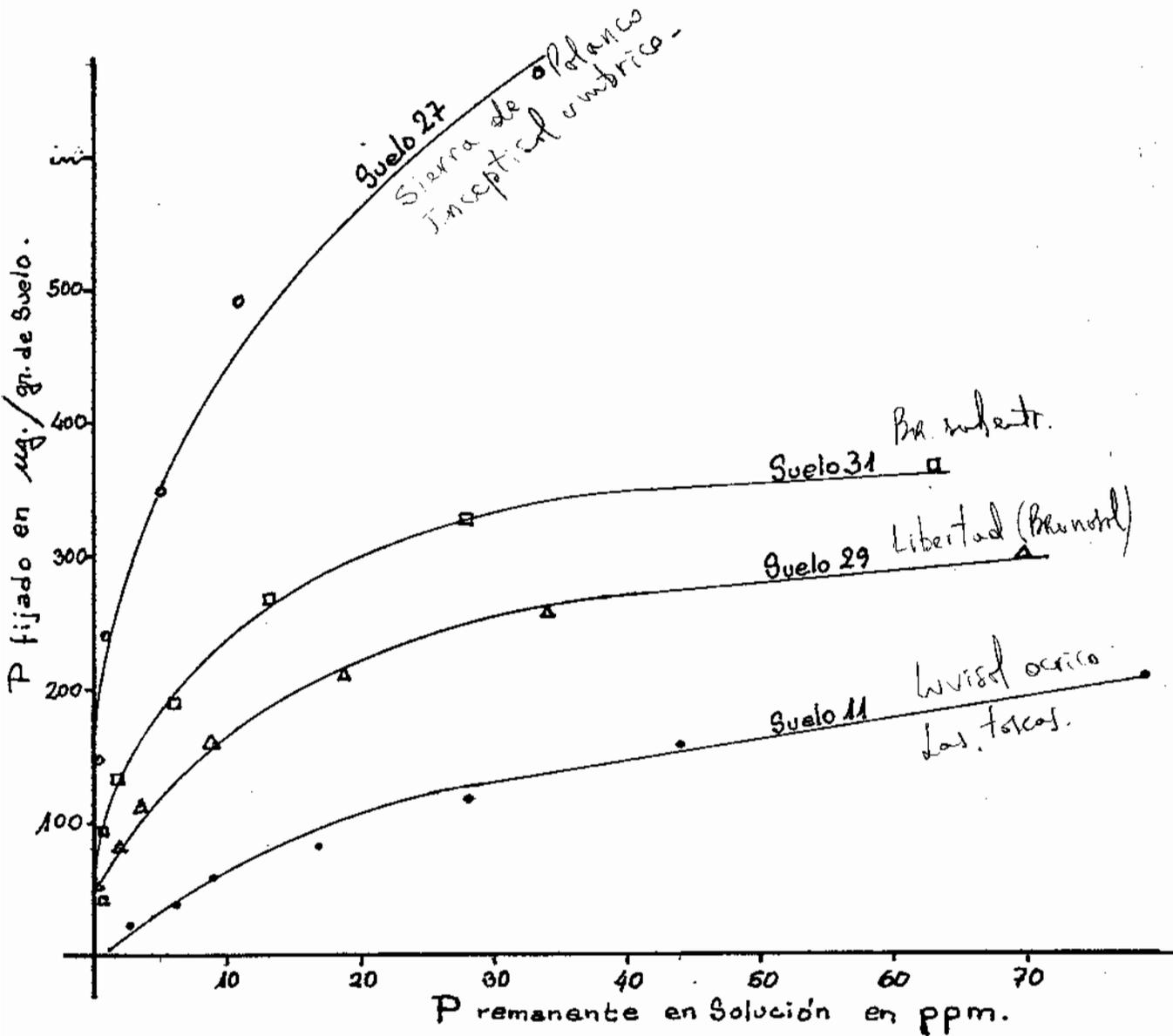


Figura 7 : Isothermas de adsorción de fósforo en escala lineal.- Las curvas se ajustaron gráficamente

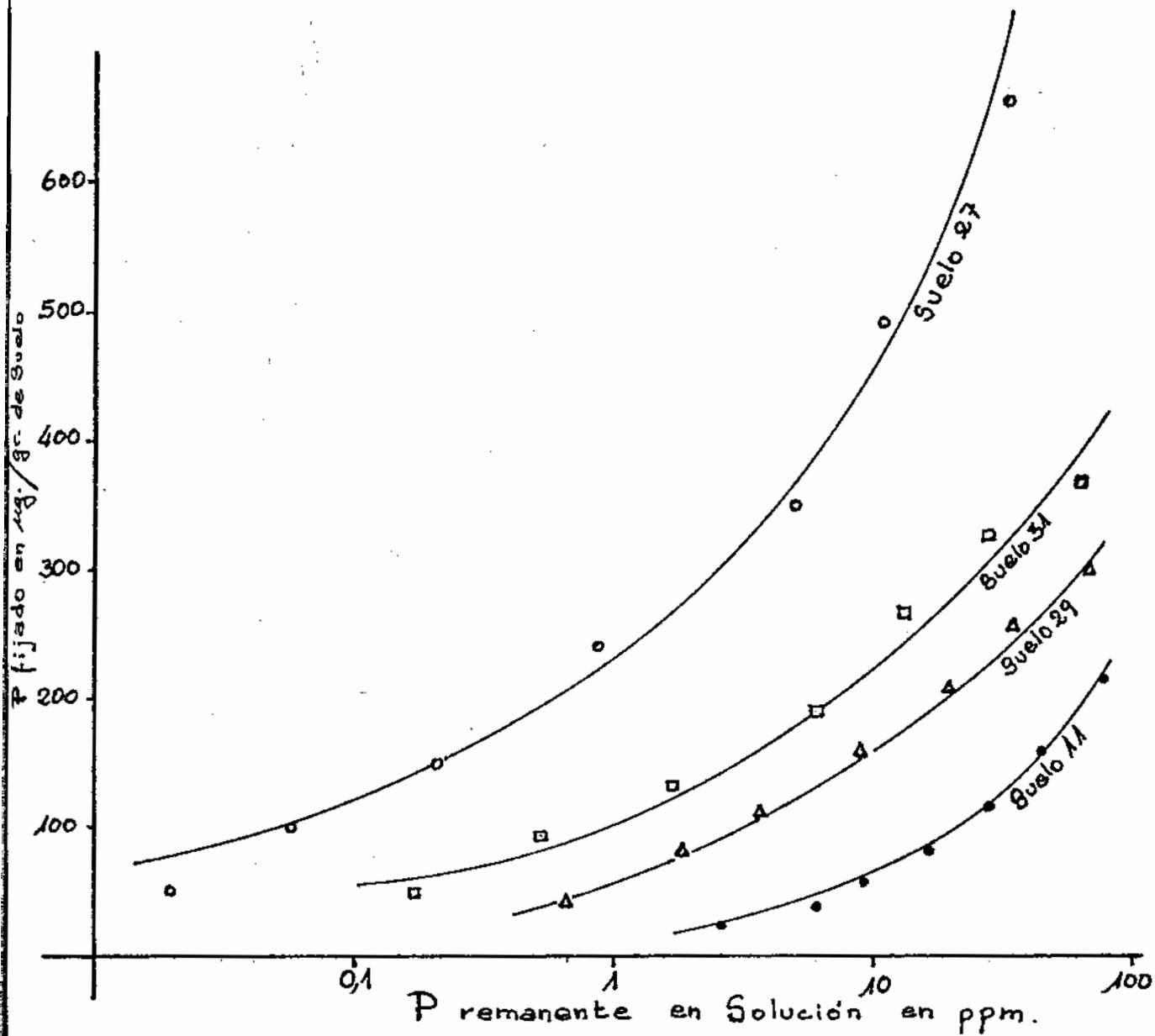


Figura 8 : Isothermas de adsorción de fósforo en escala semilogarítmica.- Las curvas se ajustaron gráficamente.-

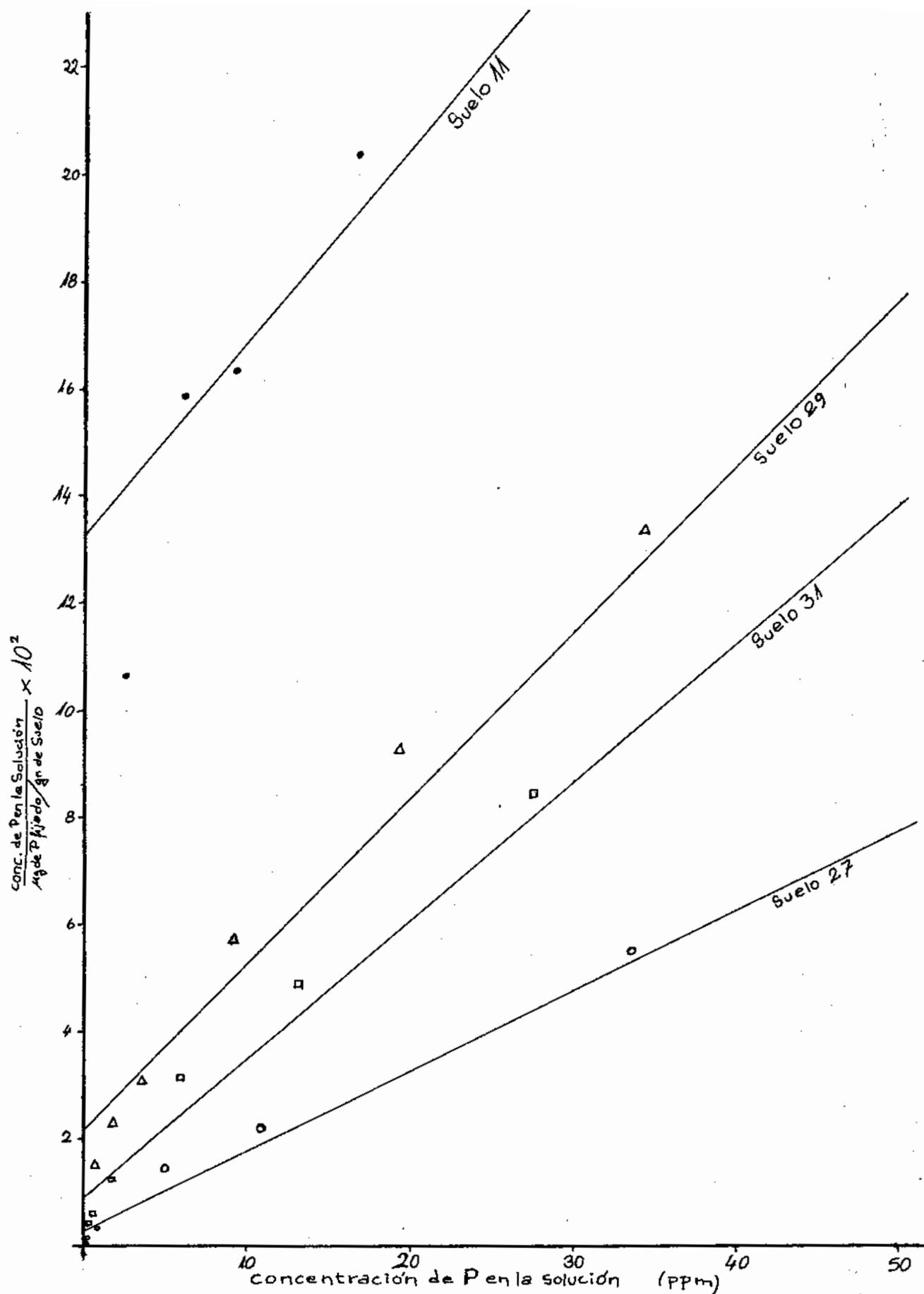


Figura 9: Isothermas de adsorcion, de acuerdo con el modelo de Langmuir. -

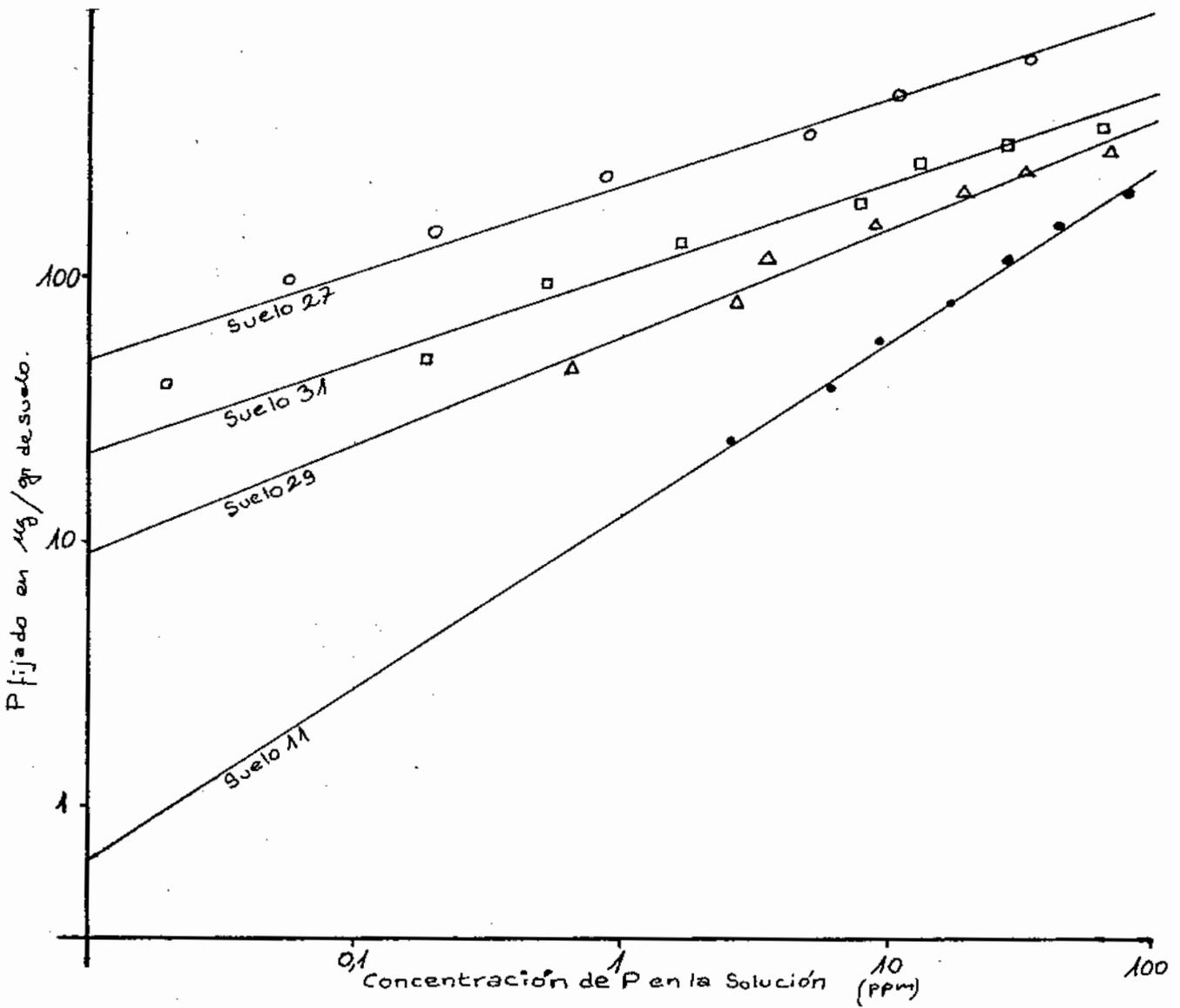


Figura 10: Isotermas de adsorción de fósforo de acuerdo con el modelo de Freundlich

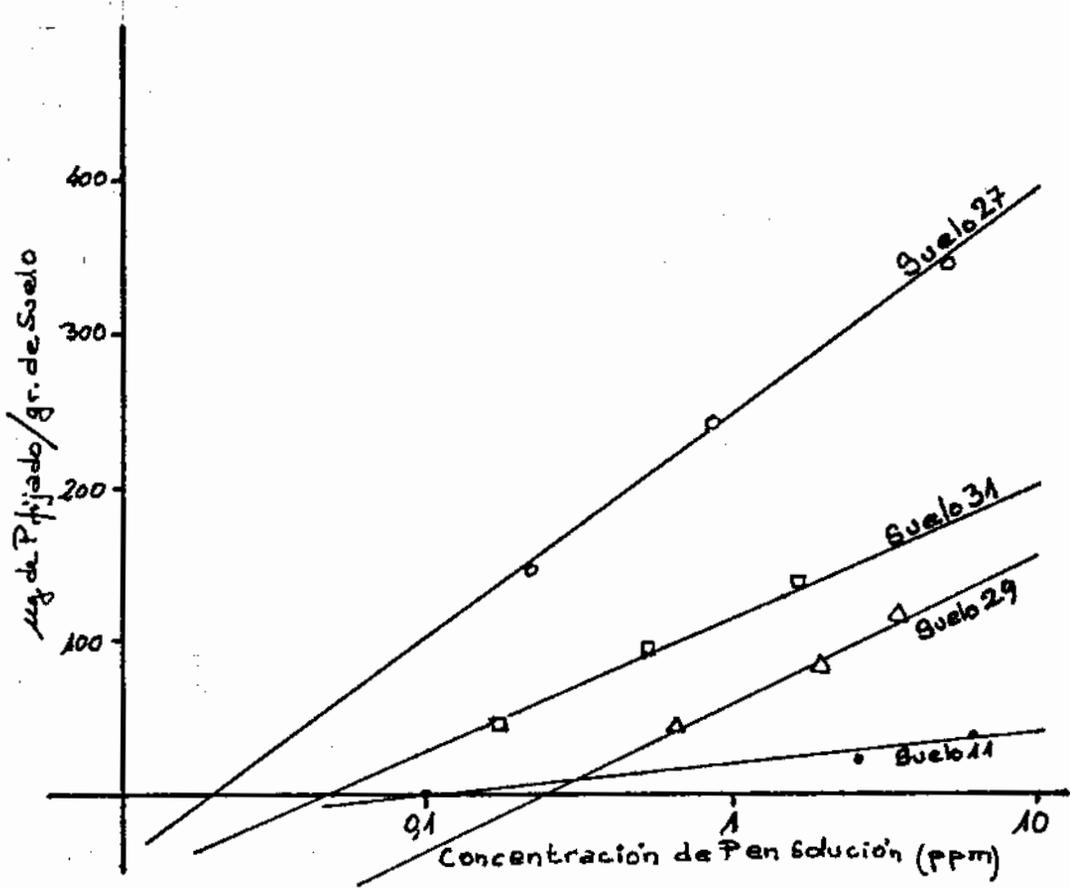


Figura 11: Isothermas de adsorción de fósforo ajustadas en base a tres puntos experimentales.-

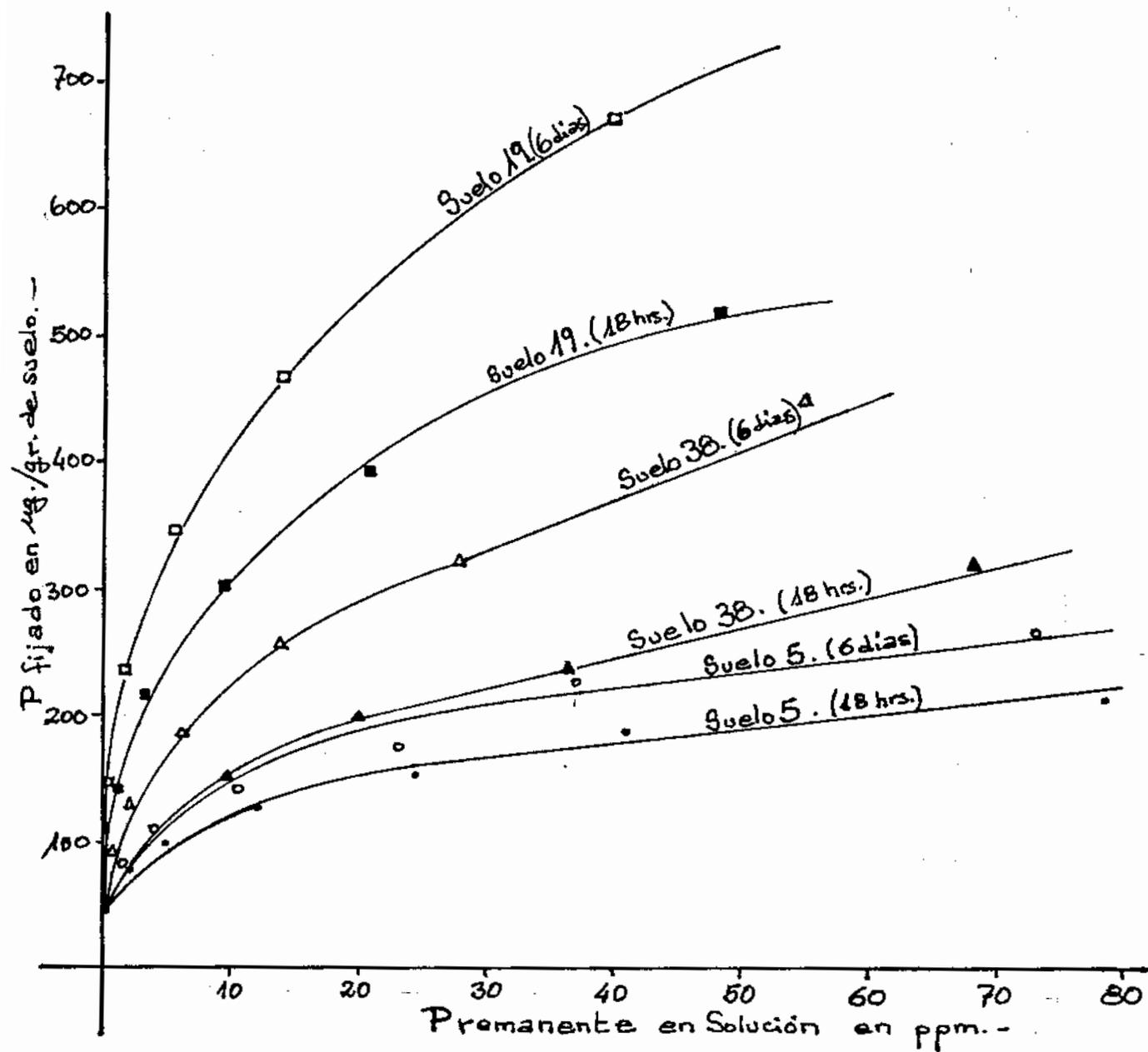


Figura 12 : Isotermas de adsorción de P determinadas con 18 hrs y 6 días de equilibrio respectivamente. Las curvas se ajustaron gráficamente. -

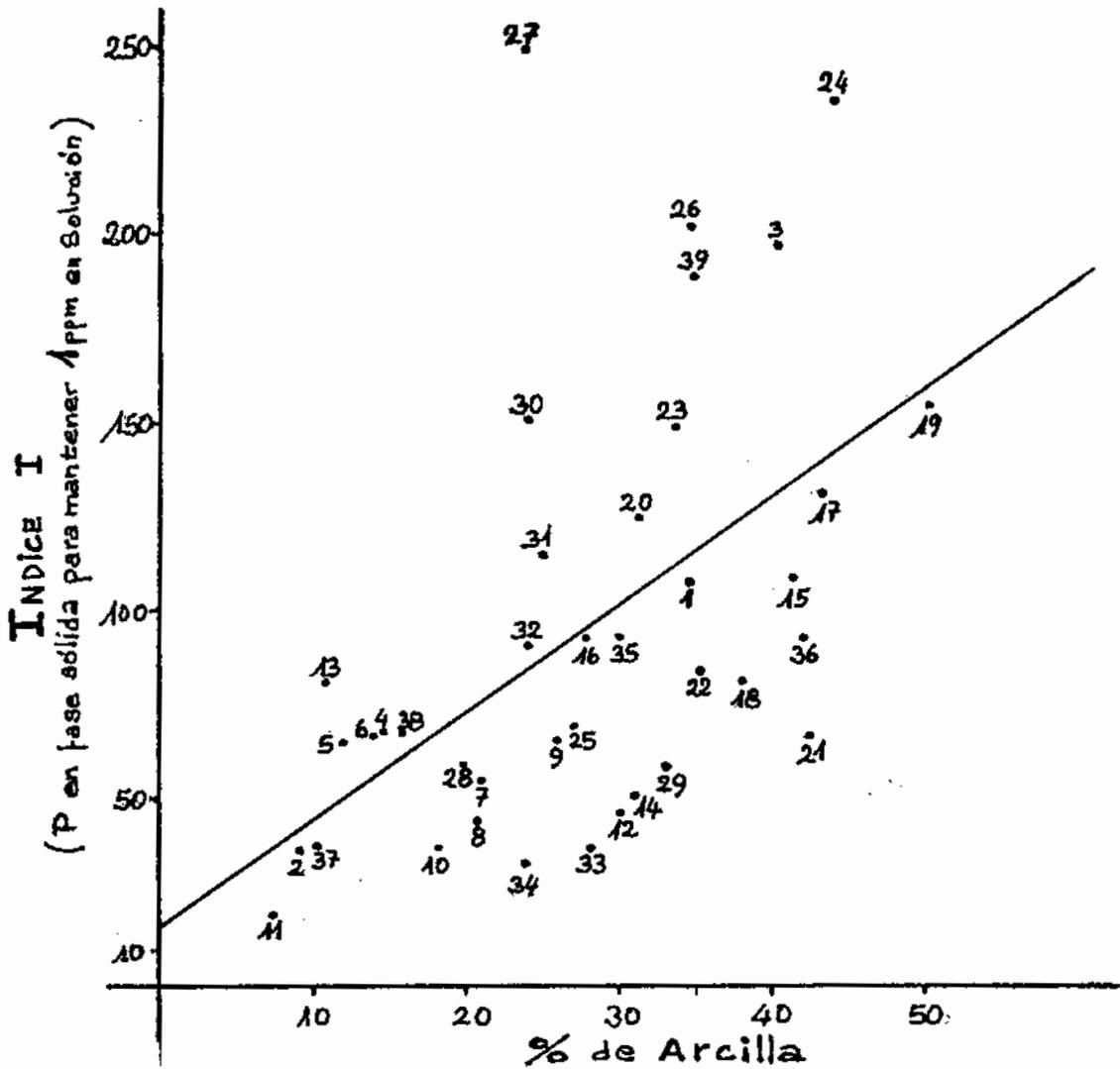


Figura 13: Recta de regresión del Índice I sobre el % de Arcilla: $\text{Ind. I} = 15,6 + 2,88(\% \text{Arc.})$ $r = 0,54^{***}$
Los puntos numerados indican la posición de cada suelo respecto a la recta. -

Cuadro 1

DETALLES METODOLÓGICOS DE LA DETERMINACION DE LAS ISOTERMAS, SEGUN DISTINTOS AUTORES

Autores	Muestra de Suelo	Fuente de Fósforo	Medio de Solución	Rango de Concentraciones	ml. de solución	Tiempo de Equilibrio	Suelos empleados
Olsen y Watabe	(24) 5 gr.	K_2HPO_4	-	-	100 ml	24 hrs.	Amplio rango
Fassbender	(11) 2,5 gr.	K_2HPO_4	-	2,5 - 250ppm	25 ml	6 hrs.	Fuertemente ácidos: aluviales, laterales y andosólicos
Fox y Kamprah	(13) 3,0 gr.	$Ca(H_2PO_4)_2$	Cl_2Ca	0,01M	30 ml	6 días	Amplio rango de texturas.
Ballard y Fiskell	(2) 5 gr.	$Ca(H_2PO_4)_2$	Cl_2Ca	0,01M	25 ml	6 días	Suelos Forestales: Planicies Costeras
Bache y Williams	(1) 5 gr.	K_2HPO_4	Cl_2Ca	0,01 M	0-50ml	18hrs.	Amplio rango
Singh y Jones	(27) 3 gr.	-	Cl_2Ca	0,01M	30 ml	6 días	De alta capacidad de fijación
Munns y Fox	(23) 3 gr.	K_2O_4	Cl_2Ca	0,01M	30 ml	6 días	Típicos: Andept y Oxisoles
Rajan y Fox	(25) 1,5 gr.	$Ca(H_2PO_4)_2$	Cl_2Ca	0,01M	30 ml	6 días	De basalto y cenizas volcánicas.
Ballaux y Peaslee	(3) 1 gr.	K_2HPO_4	-	0 - 250ppm	20 ml	23 hs.	Amplio rango

(sigue)

Cuadro 3

ISOTERMA DE LANGMUIR

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

x/m = P adsorbido
 b = máximo de adsorción
 c = concentración de P en solución
 K = constante de energía.

Suelo	Ecuación	r^{***}	b	K
1	$c/x/m = 0,012 + 0,002.c$	0,979	505	0,1650
2	$= 0,063 + 0,003.c$	0,948	331	0,0476
3	$= 0,005 + 0,0017.c$	0,986	604	0,3232
4	$= 0,03 + 0,0034.c$	0,976	298	0,1133
5	$= 0,027 + 0,0045.c$	0,993	222	0,1667
6	$= 0,031 + 0,003.c$	0,972	336	0,0970
7	$= 0,036 + 0,0028.c$	0,973	354	0,0785
8	$= 0,038 + 0,0026.c$	0,979	378	0,0699
9	$= 0,026 + 0,0025.c$	0,977	402	0,0962
10	$= 0,057 + 0,0028.c$	0,962	361	0,0484
11	$= 0,133 + 0,0032.c$	0,979	311	0,0242
12	$= 0,369 + 0,0030.c$	0,987	331	0,0817
13	$= 0,019 + 0,0027.c$	0,987	371	0,1425
14	$= 0,033 + 0,0021.c$	0,960	481	0,0623
15	$= 0,012 + 0,0018.c$	0,976	546	0,1558
16	$= 0,017 + 0,0021.c$	0,966	483	0,1222
17	$= 0,009 + 0,0019.c$	0,972	534	0,2132
18	$= 0,017 + 0,0024.c$	0,989	409	0,1465
19	$= 0,006 + 0,0019.c$	0,986	531	0,2890
20	$= 0,009 + 0,002.c$	0,987	503	0,2205
21	$= 0,02 + 0,0034.c$	0,995	296	0,1703
22	$= 0,017 + 0,0029.c$	0,991	338	0,1701
23	$= 0,0070 + 0,0018.c$	0,987	547	0,2604
24	$= 0,003 + 0,0014.c$	0,993	719	0,5041
25	$= 0,02 + 0,0035.c$	0,997	285	0,1787
26	$= 0,004 + 0,0015.c$	0,979	684	0,3747
27	$= 0,003 + 0,0015.c$	0,989	675	0,5769
28	$= 0,024 + 0,0047.c$	0,996	214	0,1937
29	$= 0,022 + 0,0031.c$	0,995	322	0,1382
30	$= 0,008 + 0,0022.c$	0,988	447	0,2955
31	$= 0,009 + 0,0026.c$	0,996	380	0,2863
32	$= 0,014 + 0,0025.c$	0,988	402	0,1767
33	$= 0,048 + 0,0039.c$	0,988	258	0,0799
34	$= 0,046 + 0,0035.c$	0,988	289	0,0746
35	$= 0,013 + 0,0023.c$	0,988	436	0,1815
36	$= 0,015 + 0,0018.c$	0,974	559	0,1189
37	$= 0,043 + 0,0044.c$	0,992	229	0,1003
38	$= 0,026 + 0,0030.c$	0,979	337	0,1126
39	$= 0,004 + 0,0015.c$	0,993	657	0,3755

r^{***} = Coeficientes de correlación significativos al 1%.

Cuadro 4

ISOTERMA DE FREUNDLICH $y=a \cdot c^{1/n}$

$$\log y = \log a + \frac{1}{n} \cdot \log c$$

$y = P$ adsorbido
 $c =$ concentración de P en solución
 $n, n =$ constantes.

Suelo	Ecuación: $\log y = \log a + \frac{1}{n} \cdot \log c$	n^{***}	a
1	$\log y = 1,999 + 0,400 \cdot \log c$	0,998	99,8
2	" = 1,528 + 0,473 $\cdot \log c$	0,994	33,7
3	" = 2,232 + 0,326 $\cdot \log c$	0,984	170,6
4	" = 1,799 + 0,341 $\cdot \log c$	0,997	62,9
5	" = 1,804 + 0,263 $\cdot \log c$	0,983	63,7
6	" = 1,793 + 0,366 $\cdot \log c$	0,997	62,1
7	" = 1,710 + 0,424 $\cdot \log c$	0,998	51,3
8	" = 1,648 + 0,480 $\cdot \log c$	0,999	44,5
9	" = 1,788 + 0,430 $\cdot \log c$	0,999	61,4
10	" = 1,539 + 0,495 $\cdot \log c$	0,989	34,6
11	" = 1,108 + 0,653 $\cdot \log c$	0,998	12,8
12	" = 1,659 + 0,448 $\cdot \log c$	0,998	45,6
13	" = 1,875 + 0,802 $\cdot \log c$	0,999	74,9
14	" = 1,638 + 0,513 $\cdot \log c$	0,999	48,7
15	" = 2,009 + 0,414 $\cdot \log c$	0,999	102,1
16	" = 1,935 + 0,401 $\cdot \log c$	0,998	86,1
17	" = 2,089 + 0,371 $\cdot \log c$	0,997	122,7
18	" = 1,879 + 0,415 $\cdot \log c$	0,992	75,7
19	" = 2,188 + 0,300 $\cdot \log c$	0,997	154,2
20	" = 2,051 + 0,388 $\cdot \log c$	0,995	112,5
21	" = 1,808 + 0,374 $\cdot \log c$	0,991	64,3
22	" = 1,888 + 0,353 $\cdot \log c$	0,996	77,3
23	" = 2,132 + 0,363 $\cdot \log c$	0,998	135,5
24	" = 2,312 + 0,394 $\cdot \log c$	0,994	205,1
25	" = 1,826 + 0,351 $\cdot \log c$	0,994	62,9
26	" = 2,289 + 0,341 $\cdot \log c$	0,998	194,5
27	" = 2,349 + 0,327 $\cdot \log c$	0,989	223,4
28	" = 1,767 + 0,309 $\cdot \log c$	0,992	58,5
29	" = 1,778 + 0,407 $\cdot \log c$	0,988	58,9
30	" = 2,141 + 0,286 $\cdot \log c$	0,994	138,4
31	" = 2,015 + 0,338 $\cdot \log c$	0,988	103,5
32	" = 1,918 + 0,391 $\cdot \log c$	0,985	82,8
33	" = 1,585 + 0,421 $\cdot \log c$	0,996	38,5
34	" = 1,580 + 0,454 $\cdot \log c$	0,997	38,0
35	" = 2,004 + 0,349 $\cdot \log c$	0,998	100,92
36	" = 1,922 + 0,468 $\cdot \log c$	0,997	83,6
37	" = 1,617 + 0,386 $\cdot \log c$	0,997	41,4
38	" = 1,802 + 0,378 $\cdot \log c$	0,999	63,4
39	" = 2,24 + 0,381 $\cdot \log c$	0,996	173,8

n^{***} = coeficientes de correlación significativos al 1%.

Cuadro 5ISOTERMAS AJUSTADAS EN BASE A TRES PUNTOS EXPERI-
MENTALES

$Y = a + b \cdot \log c$ $y = P$ adsorbido
 $c =$ concentración de P en solución
 $b =$ coeficiente de regresión
 $a =$ intercepto.

Suelo	Ecuación	r
1	$Y = 108,1 + 85,5 \cdot \log c$	0,999***
2	$Y = 36,0 + 48,9 \cdot \log c$	0,99 **
3	$Y = 196,7 + 97,1 \cdot \log c$	0,997**
4	$Y = 67,7 + 56,6 \cdot \log c$	0,974
5	$Y = 65,6 + 47,1 \cdot \log c$	0,998**
6	$Y = 66,9 + 52,3 \cdot \log c$	0,987*
7	$Y = 54,9 + 57,9 \cdot \log c$	0,996**
8	$Y = 43,9 + 74,0 \cdot \log c$	0,992*
9	$Y = 65,7 + 75,4 \cdot \log c$	0,989*
10	$Y = 37,4 + 49,3 \cdot \log c$	0,904
11	$Y = 19,6 + 20,4 \cdot \log c$	0,934
12	$Y = 46,1 + 65,1 \cdot \log c$	0,991*
13	$Y = 80,9 + 73,9 \cdot \log c$	0,995*
14	$Y = 51,5 + 75,5 \cdot \log c$	0,992*
15	$Y = 108,8 + 82,2 \cdot \log c$	0,994*
16	$Y = 93,7 + 74,5 \cdot \log c$	0,993*
17	$Y = 131,6 + 128,2 \cdot \log c$	0,994*
18	$Y = 81,6 + 100,8 \cdot \log c$	0,993*
19	$Y = 154,5 + 113,2 \cdot \log c$	0,986
20	$Y = 125,3 + 138,5 \cdot \log c$	0,991*
21	$Y = 66,9 + 70,9 \cdot \log c$	0,986
22	$Y = 83,9 + 71,9 \cdot \log c$	0,998**
23	$Y = 148,7 + 122,6 \cdot \log c$	0,993*
24	$Y = 236 + 187,7 \cdot \log c$	0,999***
25	$Y = 69,9 + 63,2 \cdot \log c$	0,996**
26	$Y = 202,1 + 129,0 \cdot \log c$	0,999***
27	$Y = 248,9 + 145,8 \cdot \log c$	0,999***
28	$Y = 59,8 + 53,4 \cdot \log c$	0,992*
29	$Y = 59,0 + 96,2 \cdot \log c$	0,996**
30	$Y = 151,0 + 77,9 \cdot \log c$	0,978
31	$Y = 115,1 + 86,1 \cdot \log c$	0,998**
32	$Y = 90,9 + 104,1 \cdot \log c$	0,982
33	$Y = 36,6 + 57,6 \cdot \log c$	0,950
34	$Y = 33,2 + 70,1 \cdot \log c$	0,969
35	$Y = 92,9 + 115,9 \cdot \log c$	0,997**
36	$Y = 92,7 + 103,8 \cdot \log c$	0,996**
37	$Y = 37,9 + 61,3 \cdot \log c$	0,989*
38	$Y = 67,8 + 65,9 \cdot \log c$	0,991*
39	$Y = 188,8 + 185,6 \cdot \log c$	0,989*

* significativo al 10%

** " " 5%

*** " " 1%

Cuadro 6

VALORES PARA CADA SUELO DE LOS 5 INDICES DE FIJACION PRO-
PUESTOS

Suelo	Indice I	Indice II	Indice III	Indice IV	Indice V
1	108,1	505,0	0,1650	71,5	99,8
2	36,0	331,2	0,0476	15,0	33,7
3	196,7	604,2	0,3232	147,6	170,6
4	67,7	298,2	0,1133	30,3	62,9
5	65,6	222,6	0,1667	31,8	63,7
6	66,9	336,1	0,0970	29,7	62,1
7	54,9	354,2	0,0785	25,8	51,3
8	43,9	377,9	0,0699	24,7	44,5
9	65,7	401,9	0,0962	35,3	61,4
10	37,4	361,5	0,0484	16,7	34,6
11	19,6	310,6	0,0242	7,3	12,8
12	46,1	331,3	0,0817	25,0	45,6
13	80,9	370,9	0,1425	46,3	74,9
14	51,5	481,2	0,0623	28,2	48,7
15	108,8	546,4	0,1558	73,7	102,1
16	93,7	483,1	0,1222	52,6	86,1
17	131,6	533,6	0,2132	93,8	122,7
18	81,6	409,3	0,1465	52,3	75,7
19	154,5	530,8	0,2890	119,0	154,2
20	125,3	503,5	0,2205	90,9	112,5
21	66,9	295,8	0,1703	43,0	64,3
22	83,9	338,2	0,1701	49,1	77,3
23	148,7	547,3	0,2604	113,1	135,5
24	236,0	718,9	0,5041	240,9	205,1
25	69,9	284,9	0,1787	43,2	62,9
26	202,1	683,9	0,3747	186,4	194,5
27	248,9	674,8	0,5769	246,8	223,4
28	59,8	214,4	0,1937	34,8	58,5
29	59,0	322,2	0,1382	39,1	58,9
30	151,0	446,3	0,2955	101,9	138,4
31	115,1	380,2	0,2863	84,6	103,5
32	90,9	401,8	0,1767	60,3	82,8
33	36,6	257,9	0,0799	19,1	38,5
34	33,2	289,4	0,0746	20,1	38,0
35	92,9	436,1	0,1815	67,0	100,9
36	92,7	559,3	0,1189	59,5	83,6
37	37,9	229,3	0,1003	20,9	41,4
38	67,8	336,8	0,1126	34,1	63,4
39	188,8	657,0	0,3755	179,4	173,8

Cuadro 7

CORRELACION ENTRE LOS INDICES PROPUESTOS

	INDICE I	INDICE II	INDICE III	INDICE IV	INDICE V
INDICE I	//////	0,868***	0,952***	0,976***	0,995***
INDICE II	//////	//////	0,727***	0,803***	0,860***
INDICE III	//////	//////	//////	0,965***	0,951***
INDICE IV	//////	//////	//////	//////	0,977***

*** significativo al 1%

ISOTERMAS DE 6 SUELOS, DETERMINADAS CON UN TIEMPO DE EQUILIBRIO DE 6 DIAS

Suelo	Isoterma de Langmuir	Isoterma de Freundlich	Isoterma ajustada en base a tres puntos
5	$\frac{c}{x/m} = 0,024 + 0,0036.c$ $r = 0,98^{***}$	$\log y = 1,862 + 0,299 \log c$ $r = 0,997^{***}$	$Y = 77,9 + 49,9 \log c$ $r = 0,994^*$
18	$\frac{c}{x/m} = 0,003 + 0,0018.c$ $r = 0,98^{***}$	$\log y = 2,055 + 0,402 \log c$ $r = 0,998^{***}$	$Y = 123,4 + 130,9 \log c$ $r = 0,995^*$
19	$\frac{c}{x/m} = 0,004 + 0,0014.c$ $r = 0,98^{***}$	$\log y = 2,305 + 0,319 \log c$ $r = 0,998^{***}$	$Y = 206,1 + 131,2 \log c$ $r = 0,993^*$
27	$\frac{c}{x/m} = 0,001 + 0,0013.c$ $r = 0,99^{***}$	$\log y = 2,424 + 0,358 \log c$ $r = 0,988^{***}$	$Y = 317,3 + 209,9 \log c$ $r = 0,998^*$
29	$\frac{c}{x/m} = 0,011 + 0,0018.c$ $r = 0,97^{***}$	$\log y = 2,045 + 0,386 \log c$ $r = 0,998^{***}$	$Y = 116,6 + 77,4 \log c$ $r = 0,991^*$
38	$\frac{c}{x/m} = 0,013 + 0,0022.c$ $r = 0,97^{***}$	$\log y = 2,037 + 0,328 \log c$ $r = 0,995^{***}$	$Y = 107 + 51,2 \log c$ $r = 0,994^*$

* significativo al 10%

** significativo al 5%

*** significativo al 1%

Cuadro 9

INDICES DE FIJACION DETERMINADOS CON 18 Hr. Y 6 DIAS DE EQUILIBRIO RESPECTIVAMENTE, Y CORRELACION ENTRE ELLOS

Suelos	INDICE I		INDICE II		INDICE III		INDICE IV		INDICE V	
	18 hs.	6 días	18 hs.	6 días	18 hs.	6 días	18 hs.	6 días	18 hs.	6 días
5	65,6	77,9	222,6	278,8	0,1667	0,1516	31,8	36,7	63,7	72,6
18	81,6	123,4	409,3	546,7	0,1465	0,1948	52,3	89,1	75,7	113,5
19	154,5	206,1	530,8	688,2	0,2890	0,3850	119,0	191,0	154,2	201,8
27	248,0	317,3	674,0	745,2	0,5709	0,9160	246,8	356,2	223,4	265,5
29	59,0	116,6	322,2	546,5	0,1382	0,1671	39,1	77,4	58,9	110,9
38	67,0	107,0	336,8	463,6	0,1126	0,1621	34,1	64,7	63,4	108,9
r	0,986***		0,935***		0,992***		0,995***		0,978***	
Δ %	47 %		34 %		30 %		63 %		45 %	Δ% Media 44 %

*** Significativo al 1%

Cuadro 10

REGRESIONES SIMPLES Y DOBLES ENTRE DOS INDICES DE FIJACION Y LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS. Coeficientes de correlación entre las propiedades.

ANALISIS PARA INDICE I

Variable	Ecuación de Regresión	r	r ²
% Arcilla	$Y = 15,6 + 2,88x$	0,54***	0,29
% Fe ₂ O ₃	$Y = 56,8 + 32x$	0,68***	0,46
% Al int.	$Y = 88 + 2,4x$	0,33** (0,87**)	0,11 (0,75)
% Fe ₂ O ₃	$Y = 57 + 905x$	0,53***	0,27
% Arcilla			
% H.O.	$Y = 56 + 6,6x$	0,27*	0,06
pH	$Y = 191 - 16,2x$	-0,17 ^{ns}	0,03
CIC Arcilla	$Y = 74 + 0,47x$	0,14 ^{ns}	0,019

Ref.: Entre paréntesis (): coeficientes para el % de Al cuando se incluye en el análisis sólo los 7 suelos que lo poseen.

Variables X ₁ -X ₂	Ecuación de Regresión	r	r ²
%Arc.-%Fe ₂ O ₃	$Y = 19,2 + 1,6x_1 + 26x_2$	0,75***	0,54
%Arc.-%Al	$Y = -19,2 + 3,7x_1 + 3,9x_2$	0,75***	0,56
%Arc.- $\frac{Fe_2O_3}{Arc.}$	$Y = -10,8 + 2,6x_1 + 794x_2$	0,72***	0,52
%Arc.-%M.O.	$Y = 15,8 + 5x_1 - 12,9x_2$	0,61***	0,37
%Arc.-pH	$Y = 256 + 4x_1 - 45,6x_2$	0,70***	0,49
%Arc.-CIC Arc.	$Y = 29,4 + 3,4x_1 - 0,7x_2$	0,57***	0,32

Cuadro 10 (continuación)

ANÁLISIS PARA ÍNDICE II

Variable	Ecuación de Regresión	r	r ²
% Arcilla	Y = 212 + 7,6x	0,61***	0,38
%Fe ₂ O ₃	Y = 335 + 71x	0,65***	0,43
%Al int.	Y = 415 + 1,57x	0,09 ^{ns} (0,35)	0,009 (0,12)
$\frac{\%Fe_2O_3}{\% Arc.}$	Y = 342 + 1875x	0,47***	0,22
% M.O.	Y = 310 + 24,8x	0,4**	0,16
pH	Y = 336 + 9,04x	0,04 ^{ns}	0,002
CIC Arcilla	Y = 349 + 1,63x	0,20 ^{ns}	0,04

Ref.: Entre paréntesis (): coeficientes para el % de Al cuando se incluye en el análisis sólo los 7 suelos que lo poseen.

Variables X ₁ - X ₂	Ecuación de Regresión	r	r ²
%Arc.-%Fe ₂ O ₃	Y=219+5x ₁ +52x ₂	0,75***	0,57
%Arc.-%Al	Y=166+8,7x ₁ +5,1x ₂	0,68***	0,46
$\frac{\%Fe_2O_3}{\% Arc.}$	Y=158+7,1x ₁ +1615x ₂	0,74***	0,55
%Arc.-%M.O.	Y=212+10,4x ₁ -17,8x ₂	0,64***	0,41
%Arc.-pH	Y=514+9x ₁ -57,3x ₂	0,66***	0,44
%Arc.-CIC Arc.	Y=238+8,6x ₁ -1,2x ₂	0,63***	0,40

.	$\frac{\%Fe_2O_3}{\% Arc.}$	%Fe ₂ O ₃	% Al	%M.O.	pH	CIC Arc.
% Arcilla	0,09 ^{ns}	0,425***	-0,3*	0,81***	0,428***	0,525***
% Fe ₂ O ₃	0,95***					

ns: no significativo

* : significativo al 10%

** : significativo al 5%

*** : significativo al 1%

Cuadro 11

REGRESIONES Y CORRELACIONES MULTIPLES

t = valor obtenido en prueba de significación estadística para los coeficientes de regresión

*** = significativos al 1%

Y_1 = Índice I

x_3 = % Fe_2O_3 / % Arcilla

Y_2 = Índice II

x_4 = CIC Arcilla

x_1 = % Arcilla

x_5 = pH

x_2 = % Al

x_6 = Materia Orgánica

INDICE I

Variable

Incorporada	Ecuación de Regresión	r^{***}	r^2
%Arcilla	$Y_1 = 15,6 + 2,88x_1$ t = 3,9***	0,540	0,292
% Al	$Y_1 = -19,3 + 3,75x_1 + 3,95x_2$ t = 6,0*** 4,6***	0,746	0,556
% Fe_2O_3 % Arc.	$Y_1 = -42,1 + 3,47x_1 + 3,62x_2 + 756,38x_3$ t = 7,3*** 5,5*** 5,2***	0,865	0,748
pH	$Y_1 = 121,4 + 4x_1 + 2,72x_2 + 757,22x_3 - 29,55x_5$ t = 9,1*** 4,4*** 5,9*** -3,5***	0,903	0,816
M.O.	$Y_1 = 122,6 + 4,98x_1 + 2,61x_2 + 713,27x_3 - 29,28x_5 - 6,27x_6$ t = 7,4*** 4,3*** 5,7*** -3,6*** -1,9**	0,913	0,833
CIC Arcilla	$Y_1 = 129,9 + 5,35x_1 + 2,43x_2 + 713,94x_3 - 29,06x_5 - 7,1x_6 - 0,34x_4$ t = 7,2*** 3,9*** 5,7*** -3,6*** -2,1** -1,13	0,916	0,84

Cuadro 11 (continuación)

INDICE II

Variable Incorporada	Ecuación de Regresión	r***	r ²
% Arcilla	$Y_2 = 211,9 + 7,56x_1$ t = 4,7***	0,615	0,378
%Fe ₂ O ₃ %Arcilla	$Y_2 = 154,9 + 7,11x_1 + 1680,83x_3$ t = 5,2*** 3,8***	0,746	0,557
% Al	$Y_2 = 118,4 + 3,12x_1 + 1586,46x_3 + 4,49x_2$ t = 6,0*** 3,8*** 2,4***	0,788	0,621
pH	$Y_2 = 318,7 + 0,76x_1 + 1587,49x_3 + 3,38x_2 - 36,19x_5$ t = 6,2*** 3,9*** 1,7* -1,3*	0,800	0,640
CIC Arcilla	$Y_2 = 334,4 + 9,28x_1 + 1601,73x_3 + 3,01x_2 - 35,76x_5 - 0,74x_4$ t = 5,9*** 3,9*** 1,45* -1,3* -0,75	0,804	0,646
M.O.	$Y_2 = 339,3 + 10,7x_1 + 1546,45x_3 + 2,79x_2 - 35,33x_5 - 0,9x_4 - 8,31x_6$ t = 4,2*** 3,6*** 1,3* -1,3 -0,9 -0,7	0,807	0,652

	% Arcilla	% Al	%Fe ₂ O ₃ %Arcilla	CIC Arcilla	pH
% Al	-0,30	/	/	/	/
%Fe ₂ O ₃ % Arc.	0,08	0,06	/	/	/
CIC Arc.	0,52	-0,37	0,06	/	/
pH	0,43	-0,48	0,004	0,32	/
M.O.	0,81	-0,32	-0,05	0,34	0,38

APENDICE

En esta parte se presentan los datos experimentales tal cual fueron obtenidos.

X = Concentración de P en la solución, luego de equilibrarse con el suelo (ppm).

Y = $\mu\text{g.}$ de P fijados por gramo de suelo.

Cada punto experimental corresponde a agregados de 0, 50, 100, 150, 250, 400, 600 y 1.000 $\mu\text{g.}$ de P/gr. de suelo, respectivamente.

<u>SUELO 1</u>		<u>SUELO 2</u>		<u>SUELO 3</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,000	-	0,009	-	0,002	-
0,198	48,02	1,100	38,99	0,035	49,65
0,671	93,29	3,846	61,54	0,084	99,16
1,868	131,32	7,050	79,50	1,098	139,02
5,370	196,30	14,230	107,70	2,183	228,17
12,280	277,24	24,990	150,02	6,781	332,18
25,160	348,40	40,100	199,14	17,079	429,21
51,730	482,70	72,050	279,53	41,085	589,15

<u>SUELO 4</u>		<u>SUELO 5</u>		<u>SUELO 6</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,000	-	0,032	-	0,012	-
0,328	46,18	0,377	46,23	0,374	46,25
2,143	78,57	2,091	79,09	2,119	78,81
4,160	108,40	5,025	99,75	4,515	104,85
10,989	140,11	12,177	128,23	10,950	140,46
22,572	174,28	24,552	154,48	21,480	185,16
38,613	213,87	41,150	188,50	36,380	236,14
71,280	287,20	78,655	213,45	68,560	314,42

<u>SUELO 7</u>		<u>SUELO 8</u>		<u>SUELO 9</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,055	-	0,010	-	0,010	-
0,620	43,8	0,878	41,22	0,501	44,99
2,470	75,25	2,752	72,48	1,891	81,09
5,200	98,00	5,100	98,99	3,739	112,61
11,340	136,64	10,990	140,11	9,306	156,94
21,190	188,14	20,790	192,10	18,414	215,86
36,260	237,38	35,150	248,52	32,800	272,03
68,060	319,40	67,070	329,28	63,110	368,90

<u>SUELO 10</u>		<u>SUELO 11</u>		<u>SUELO 12</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,000	-	0,000	-	0,035	-
1,006	39,94	2,580	24,20	0,819	41,81
4,245	57,55	6,138	38,62	2,841	71,59
6,438	85,62	9,306	56,94	5,373	96,27
12,870	121,30	16,780	82,20	11,310	136,89
23,170	168,34	28,310	116,86	21,681	183,10
38,680	213,25	44,180	158,18	35,870	241,22
70,040	299,58	78,950	210,48	70,785	292,15

<u>SUELO 13</u>		<u>SUELO 14</u>		<u>SUELO 15</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,040	-	0,008	-	0,009	-
0,330	46,70	0,724	42,44	0,174	48,26
1,346	86,54	2,400	75,99	0,737	92,63
3,070	119,30	4,580	104,20	1,764	132,36
8,167	168,32	9,604	153,96	5,123	198,77
17,620	223,78	18,410	215,86	11,880	281,20
32,300	276,99	31,770	282,31	22,930	370,67
64,845	351,55	58,900	410,95	48,510	514,90

SUELO 16

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,010	-
0,228	47,72
1,034	89,65
2,431	125,68
7,276	177,23
14,900	251,00
28,090	319,06
54,200	457,97

SUELO 17

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,018	-
0,093	49,07
0,484	95,16
1,263	137,40
3,910	210,90
10,030	299,70
24,320	356,80
46,830	531,73

SUELO 18

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,050	-
0,422	45,78
1,283	87,17
2,500	124,99
6,780	182,18
15,740	242,59
30,070	299,26
61,380	386,20

SUELO 19

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,011	-
0,017	49,83
0,277	97,23
0,953	140,47
3,220	217,83
9,650	303,48
20,740	392,58
48,150	519,85

SUELO 20

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,045	-
0,159	48,41
0,554	94,46
1,387	136,13
3,886	211,14
10,791	292,09
23,762	362,38
51,233	487,67

SUELO 21

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,027	-
0,466	45,34
1,916	80,84
3,794	112,06
9,257	157,43
20,196	198,04
33,291	267,09
72,518	274,82

SUELO 22

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,024	-
0,298	47,02
1,228	87,72
3,013	119,87
8,564	164,36
18,691	213,09
31,810	281,94
68,040	319,62

SUELO 23

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,011	-
0,074	49,26
0,346	96,54
0,990	140,10
3,340	216,64
9,603	303,97
19,925	400,75
47,025	529,75

SUELO 24

<u>X</u>	<u>Y</u>
0,013	-
0,035	49,65
0,180	98,20
0,346	146,53
1,032	239,68
3,960	360,40
8,960	510,40
30,940	690,62

<u>SUELO 25</u>		<u>SUELO 26</u>		<u>SUELO 27</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,015	-	0,011	-	0,017	-
0,402	45,98	0,017	49,83	0,020	49,80
1,762	82,38	0,158	98,42	0,057	99,43
4,005	109,95	0,365	146,35	0,208	147,92
9,351	156,49	1,733	232,67	0,851	241,49
19,444	205,56	6,039	339,61	5,019	349,81
36,200	238,00	13,032	469,68	10,878	491,22
73,013	269,87	33,120	668,85	33,635	663,65

<u>SUELO 28</u>		<u>SUELO 29</u>		<u>SUELO 30</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,000	-	0,125	-	0,020	-
0,501	44,99	0,665	43,35	0,040	49,60
2,386	76,14	1,861	81,39	0,177	98,23
5,026	99,74	3,565	114,35	1,048	139,51
11,800	136,20	9,158	158,42	4,262	207,38
24,463	155,37	19,305	206,95	12,969	270,31
40,321	196,79	34,405	255,95	24,257	357,43
79,691	203,05	70,043	299,57	56,083	439,17

<u>SUELO 31</u>		<u>SUELO 32</u>		<u>SUELO 33</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,017	-	0,000	-	0,025	-
0,174	48,26	0,231	47,70	1,032	39,68
0,535	94,65	0,842	91,60	3,820	61,79
1,684	133,16	2,358	126,40	6,170	88,35
5,990	190,10	6,790	182,14	13,560	114,37
13,167	268,33	15,460	245,36	24,630	153,69
27,475	325,25	29,330	306,70	41,090	189,12
63,360	366,40	61,550	384,47	76,970	230,28

<u>SUELO 34</u>		<u>SUELO 35</u>		<u>SUELO 36</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,000	-	0,022	-	0,030	-
1,120	38,80	0,105	48,95	0,347	46,53
3,554	64,46	0,921	90,79	1,020	89,80
5,812	91,88	2,166	128,33	2,117	128,83
12,580	124,22	6,286	187,13	5,940	190,60
23,760	162,40	13,510	264,86	12,870	271,30
39,660	203,35	27,290	327,11	23,640	363,62
74,370	256,30	58,410	415,90	49,000	509,95

<u>SUELO 37</u>		<u>SUELO 38</u>		<u>SUELO 39</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,017	-	0,000	-	0,022	-
1,022	39,80	0,436	45,64	0,035	49,65
3,376	66,24	1,883	81,17	0,297	97,03
6,120	88,80	3,963	110,37	0,656	143,44
13,490	115,11	9,989	150,11	1,624	233,66
25,470	145,27	20,048	199,52	5,247	347,53
42,080	179,22	36,447	235,53	12,620	473,76
78,950	210,48	67,939	320,61	37,070	629,24

Datos experimentales del ensayo de adsorción

con 6 días de equilibrio

<u>SUELO 5</u>		<u>SUELO 18</u>		<u>SUELO 19</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,025	-	0,022	-	0,012	-
0,233	47,67	0,144	48,56	0,010	49,90
1,584	84,16	0,564	94,36	0,139	98,61
3,962	110,38	1,399	136,01	0,409	145,92
10,643	143,57	4,207	207,92	1,534	234,65
22,770	172,30	10,790	292,09	5,544	344,56
37,120	228,72	21,290	387,13	13,119	468,81
73,260	267,40	48,015	519,85	39,917	670,82

<u>SUELO 27</u>		<u>SUELO 29</u>		<u>SUELO 38</u>	
<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>	<u>X</u>	<u>Y</u>
0,010	-	0,015	-	0,000	-
0,015	49,85	0,124	48,76	0,069	49,30
0,079	99,20	0,614	93,86	0,663	93,37
0,139	148,61	1,523	134,77	2,228	127,72
0,475	245,25	4,752	202,48	6,237	187,63
1,980	380,20	12,670	273,28	14,160	258,43
7,177	528,22	23,400	366,10	27,720	322,78
26,977	730,22	47,770	522,30	54,940	450,55

BIBLIOGRAFIA CITADA

1. Bache, B.W. y E.G. Williams (1971). A Phosphate Sorption Index for Soils. The Journal of Soil Science. 22(3) pp.289.
2. Ballard, R. y Fiskell, J.G. (1974). Phosphorus Retention in Coastal Plain Forest Soils: I. Relationship to Soil Properties. Soil Sci. Soc. Am. Proceedings. 38(2) pp.250.
3. Ballaux, J.C. y Peaslee, D.E. (1975). Relationships Between Sorption and Desorption of Phosphorus by Soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39 (2). pp. 275.
4. Barrow, N.J. (1970). Comparison of the Adsorption of Molybdate, Sulfate and Phosphate by Soils. Soil Science 109 (5) pp. 282.
5. Barrow, N.J. (1973) Relationship Between a Soil's Ability to Adsorb phosphate and the residual Effectiveness of Superphosphate. Australian Journal of Soil Research Vol. II N° 1, pp. 57.
6. Barrow, N.J. (1974) Effect of Previous additions of Phosphate on Phosphate Adsorption by Soils. Soil Sci. 118(2) pp. 82.
7. Barrow, N.J. y K. Spencer (1971). Factors in the Molybdenum and Phosphorus Status of Soils in the Dorrigo Plateau of New South Wales. Austr. Jour. Experimental Agriculture and Animal Husbandry. Vol. 11 N° 53. pp. 670.
8. Black, C.A. (1975) Relaciones Suelo-Planta - Ed. Hemisferio Sur.
9. Chang, S.C. y Jackson, M.L. (1957). Fractionation of Soil Phosphorus. Soil Sc. 84 (2) pp. 133.

10. Curso de Geología (1972) Tomo I. Facultad de Agronomía. A.E.A.
11. Fassbender, H.W. (1966). La adsorción de fosfato en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnia Latinoamericana, Vol. 3 N° 1-2
12. Fassbender, H.W. (1975). Química de suelos. Ed. IICA.
13. Fox, R.L. y Kamprath, E.J. (1970). Phosphate Sorption Isotherms for Evaluating the Phosphate Requirements of Soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 34 (6) pp. 902.
14. Jackson, M.L. Análisis Químico de Suelos. Ed. OMEGA 1964.
15. Jai Prakash, B.S. y Bhasker, T.D. (1974). Exchangeable Aluminum and Phosphorus Sorption of Some Acid Soils of Mysore State. Soil Sc. 118 (4) pp. 243.
16. Juo, A.S.R. y Fox, R.L. (1977). Phosphate Sorption Characteristics of Some Benue-Mark Soils of West Africa. Soil Sci. 124 (6) pp. 370.
17. Kardos, L.T. (1960). Fijación de los nutrientes vegetales en el suelo. Química del Suelo. F.E. Bear. Ed. Interciencia.
18. Khalid, R.A.; Patrick, J. W.H. y DeLaune, R.D. (1977). Phosphorus Sorption Characteristics of Flooded Soils. Soils Sci. Soc. Am. Proc. 41 (2) pp. 305.
19. Kuo, S y Lotse, E.G. (1973). Kinetics of Phosphate Adsorption and Desorption by Hematite and Gibbsite. Soil Sci. 116 (6) pp. 400.
20. Kuo, S. y Lotse, E.G. (1974) Kinetics of Phosphate Adsorption and Desorption by Lake Sediments. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38 (1) pp. 50

21. Larsen, S. (1967). Soil Phosphorus. Advances in Agronomy Vol. 19, pp. 251.
22. McKenzie Jr, E.; Kurtz, L.T. y Melsted, S.W. (1977). Phosphorus Fertility of Some Tropical Soil in Sierra Leone. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 41 (2) pp. 378.
23. Munns, D.N. y Fox, R.L. (1976). The Slow Reaction which Continues After Phosphate Adsorption: Kinetics and Equilibrium in Some Tropical Soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 40 (1) pp. 46.
24. Olsen, S.R. y Watanabe, F.S. (1957). A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by Langmuir isotherm. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 21 (2) pp. 144.
25. Rajan, S.S.S. y Fox, R.L. (1975). Phosphate Adsorption by Soils: II. Reactions in Tropical Acid Soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39 (5) pp. 846.
26. Ryden, J.C. y Syers, J.K. (1977). Origin of the Labile Phosphate Pool in Soil. Soil Science 123(6). pp. 353.
27. Singh, B.B. y Jones, J.P. (1976). Phosphorus Sorption and Desorption Characteristics of Soil as Affected by Organic Residues. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 40 (3) pp. 389.
28. Syers, J.K.; Browman, M.G.; Smillie, G.W. y Corey, R.B. (1973). Phosphate Sorption by Soils Evaluated by the Langmuir Adsorption Equation. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 37 (3) pp. 358.
29. Tisdale, S.L. y Nelson, W.L. Fertilidad de los Suelos y Fertilizantes. Ed. Montaner y Simons, S.A., Barcelona, 1970.

30. Udo, E.J. y Uzu, F.O. (1972). Characteristics of Phosphorus Adsorption by Some Nigerian Soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36(6) pp.879.
31. Víctora, C. y Zamalvide, J.P. (1972). Contribución de la materia orgánica a la capacidad de intercambio catiónico en distintos suelos del Uruguay. Tesis Ingeniero Agrónomo. Mimeografiado.
32. Vijayachandran, P.K. y Harter, R.D. (1975). Evaluation of Phosphorus Adsorption by a Cross Section of Soil Types. Soil Sc. 119 (2) pp.119
33. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay, Tomo I Clasificación de Suelos. M.A.P. Direc. de Suelos y Fertilizantes. 1976.

~~Jorge Sander~~ Alejandro Morán