

## VIII

### EL FOSFORO EN EL SUELO

#### INTRODUCCION

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

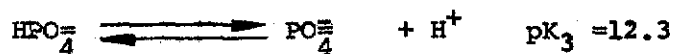
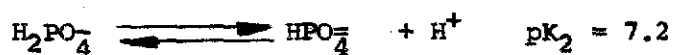
La cantidad total de fósforo en la capa arable varía ampliamente, dependiendo sobre todo del tipo de roca madre; generalmente es más alto en suelos calcáreos y bajo en suelos altamente intemperizados provenientes de rocas ácidas. Las cantidades van de 0.01 - 0.15% (200-3000 Kg/Ha), con un promedio de cerca de 0.06% (1.200 Kg/Ha), (Corey, 1968).

El fósforo juega un papel fundamental en la vida de las plantas; es constituyente de ácidos nucleicos, enzimas, vitaminas, fosfolípidos, fitina y además es indispensable en procesos donde hay transformaciones de energía.

#### FORMAS DE FOSFORO EN EL SUELO

Tanto en la fracción orgánica como en la mineral, la química

ca del fósforo está relacionada con las formas iónicas del ácido orto-fosfórico ( $H_3PO_4$ ). Este ácido tiene tres constantes de disociación:



El predominio de una u otra de las formas iónicas depende del pH (véase página 27). La Figura 8.1 (tomada de Pratt, 1966), muestra la concentración relativa de fosfatos en sus distintas formas iónicas, con el pH. Obsérvese que a valores de pH comprendidos entre 4.5 y 7.0 (comunes en los suelos), la forma dominante es  $H_2PO_4^-$ .

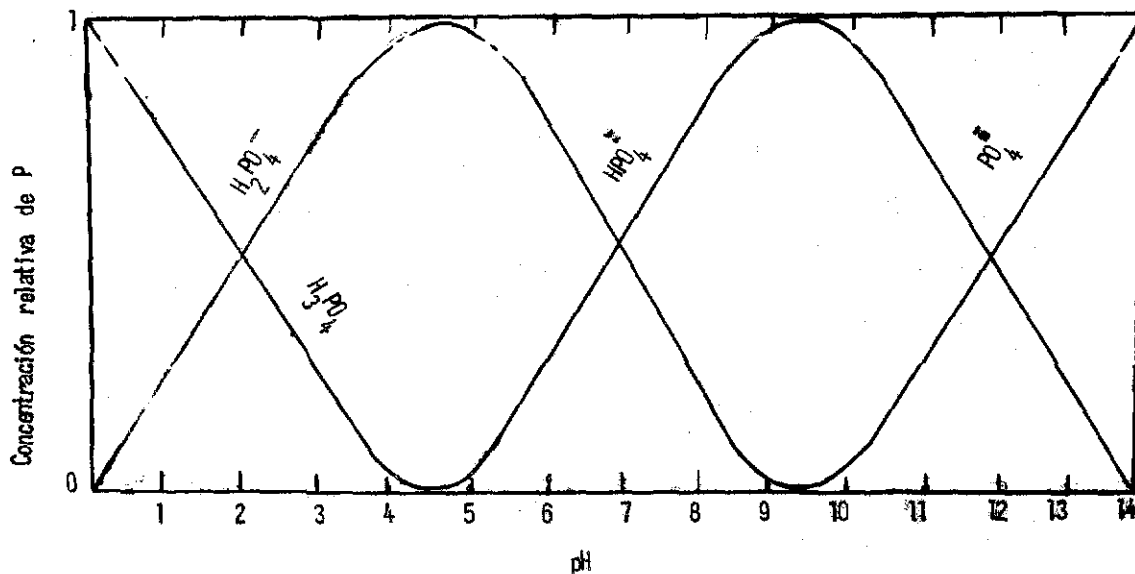


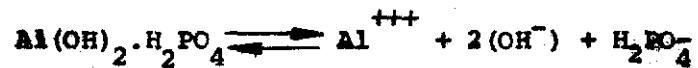
Figura 8.1.- Relación entre la concentración relativa de iones fosfato y el pH.

TABLA 8.1 Valores de pK y relación entre  $\text{pH}_2\text{PO}_4$  y el pH, para fosfatos y compuestos afines. (Pratt, 1966).

Compuestos	pK	Relación entre $\text{pH}_2\text{PO}_4$ y pH
$\text{Al(OH)}_2\text{H}_2\text{PO}_4$	30.5	$\text{pH}_2\text{PO}_4 = 10.7 - \text{pH}$
$\text{Fe(OH)}_2\text{H}_2\text{PO}_4$	35.0	$\text{pH}_2\text{PO}_4 = 10.9 - \text{pH}$
$\text{CaHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	6.56	$\text{pH}_2\text{PO}_4 = -3.14 + \text{pH}$
$\text{Ca}_4\text{H(PO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	46.91	$\text{pH}_2\text{PO}_4 = -7.22 + 5/3 \text{ pH}$
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	113.7	$\text{pH}_2\text{PO}_4 = -9.4 + 7/3 \text{ pH}$
$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$	118.4	$\text{pH}_2\text{PO}_4 = -5.18 + 2 \text{ pH}$
$\text{Al(OH)}_3$	33.8	
$\text{FeOOH}$	38.1	
$\text{CaF}_2$	9.84	

En suelos ácidos, el fósforo se encuentra como fosfatos de hierro y aluminio, mientras que en alcalinos los fosfatos cálcicos adquieren mayor importancia. En la Tabla 8.1, aparecen las relaciones existentes entre la solubilidad del fósforo de varios compuestos y el pH. Las relaciones fueron obtenidas a partir de los productos de solubilidad; por ejemplo, la relación que hay entre la solubilidad del fósforo de la variscita  $\text{Al(OH)}_3$  puede calcularse de la siguiente manera:

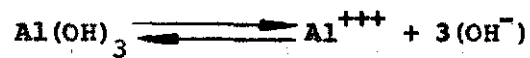
La disociación de la variscita, con constante del producto de solubilidad ( $K_v$ ) =  $3.2 \times 10^{-31}$  es:



$$K_v = (\text{Al}^{+++}) \cdot (\text{OH}^-)^2 \cdot (\text{H}_2\text{PO}_4^-)$$

$$pK_v = p^{\text{Al}} + 2p^{\text{OH}} + p\text{H}_2\text{PO}_4 = 30.5$$

Por otra parte, la gibsita ( $\text{Al(OH)}_3$ ), con producto de solubilidad (Kg) de  $1.6 \times 10^{-34}$ :



$$K_g = (\text{Al}^{+++}) \cdot (\text{OH}^-)^3 = 1.6 \times 10^{-34}$$

$$pK_g = p\text{Al} + 3p\text{OH} = 33.8$$

Despejando pAl de las dos ecuaciones e igualando:

$$33.8 - 3p\text{OH} = 30.5 - 2p\text{OH} - p\text{H}_2\text{PO}_4$$

$$p\text{H}_2\text{PO}_4 = 30.5 - 33.8 + p\text{OH}$$

$$= 30.5 - 33.8 + (14 - p\text{H})$$

$$= 10.7 - p\text{H}$$

$$\boxed{p\text{H}_2\text{PO}_4 = 10.7 - p\text{H}}$$

Esta relación indica que la actividad del ión  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , cuando éste depende de la solubilidad de la variscita, aumenta con incrementos del pH, poniendo de manifiesto que este compuesto es muy insoluble a pH ácido.

Relaciones similares pueden encontrarse para los fosfatos de hierro; pero debido a que la química de este elemento es más compleja, los valores hallados varían ligeramente de acuerdo al compuesto que se to

me como control de la actividad del hierro. El valor que aparece en la Tabla 8.1, fué calculado para el caso en que el compuesto ( $\text{FeOOH}$ ) controle la actividad del hierro. Otra relación similar puede ser hallada ( $\text{pH}_2\text{PO}_4 = 11.8 - \text{pH}$ ), usando  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  con  $\text{pK}$  de 37.2, como el compuesto que controla la actividad del hierro.

En suelos de  $\text{pH}$  elevado, la actividad del calcio controla la solubilidad del fósforo. Las relaciones encontradas indican que el  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  de los fosfatos de calcio es insoluble en suelos alcalinos, pero soluble en medios ácidos.

En la Figura 8.2 (tomada de Collis, 1971), se aprecia la relación entre la solubilidad de los fosfatos del suelo y el  $\text{pH}$ . Para una fácil interpretación de esta Figura debe recordarse que  $\text{pH}_2\text{PO}_4$  es inverso a la actividad del  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , ya que es su logaritmo negativo; pueden también tomarse los valores de  $\text{pH}_2\text{PO}_4^-$  como una escala de insolubilidad.

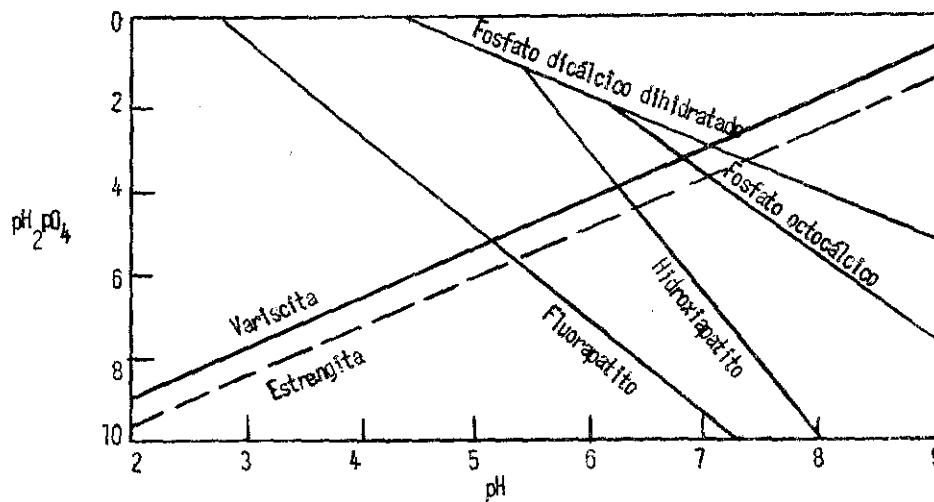


Figura 8.2.- Relación entre la solubilidad de los fosfatos del suelo y el  $\text{pH}$

Las líneas indican el comportamiento de los fosfatos con el pH, pero pueden presentarse ligeras modificaciones de acuerdo a los suelos. Por otra parte, la actividad del Al, Fe y Ca, puede ser mayor. La actividad del  $\text{Ca}^{++}$  por ejemplo, depende de la presión del  $\text{CO}_2$  y ésta varía en el suelo de acuerdo a las condiciones climáticas.

#### REACCIONES DE LOS FERTILIZANTES FOSFORICOS EN EL SUELO

La continua extracción de fósforo por las plantas y la pobreza que en este elemento se presenta en la mayor parte de los suelos, hace necesario la aplicación de altas cantidades de fertilizantes fosfóricos para suplir las necesidades de los cultivos. Aunque varios compuestos son usados como fuente de fósforo, el fosfato monocálcico ( $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ) es el que se aplica comunmente al suelo, ya que es éste el que se encuentra en los superfosfatos comerciales.

Cuando un gránulo de fosfato monocálcico se pone en contacto con el suelo húmedo, una pequeña película de agua lo rodea y en poco tiempo comienza a disolverse. A medida que el fosfato monocálcico (FMC) se disuelve, va tomando agua para convertirse en fosfato dicálcico dihidratado (FDGD) y ácido fosfórico.

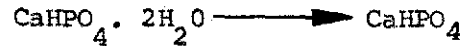


A la solución que rodea el gránulo (conteniendo FMC, FDGD y ácido fosfórico) se le llama "Solución meta-estable de punto triple" (SMPT). Esta solución tiene las siguientes características a 25°C.:

pH = 1.48; P = 3.98 moles; Ca = 1.34 moles

% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 22.0; % CaO = 6.30

La "solución meta-estable" alcanza posteriormente un segundo estado de equilibrio, cuando el PDCD se convierte en fosfato dicálcico anhidro (FDC):



Cuando este estado es alcanzado, la solución se llama "Solución del Punto Triple" (SPT), cuyas características son:

pH = 1.01; P = 4.50 moles; Ca = 1.44 moles

% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 24.5; % CaO = 5.19

A medida que transcurre el tiempo, el radio alcanzado por la solución de punto triple va siendo mayor y los minerales del suelo que la rodean se disuelven debido a la alta acidez. De este modo pasan a solución, altas cantidades de Al<sup>+++</sup>, Fe<sup>++</sup>, Mn<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, K<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y otros iones. Simultáneamente, el pH comienza a subir debido a la influencia del suelo circundante y se precipitan fosfatos simples y complejos en combinación con estos iones (ver Tabla 8.2). La precipitación del fósforo es acelerada arriba de un pH de 2.3. Cuando el pH alcanza valores superiores a 3.0 el fósforo se precipita completamente (Pratt, 1966).

En la Tabla 8.3 (Tomada de Collis, 1971), se dan las características de soluciones saturadas de varios fertilizantes fosfóricos y mezclas de fertilizantes. Se observa claramente que el efecto químico varía en

forma amplia de acuerdo al compuesto utilizado.

TABLA 8.2 Compuestos que han sido identificados al tratar el suelo con fosfato monocálcico (Collis, 1971)

Fórmula	Nombre	pKSP
$\text{PO}_4\text{HCa} \cdot \text{H}_2\text{O}$	Fosfato dicálcico monohidratado	6.56
$\text{PO}_4\text{Fe}2\text{H}_2\text{O}$	Estrengita	35.35
$\text{PO}_4\text{Fe}2\text{H}_2\text{O}$	Metastrengita	-
$(\text{PO}_4)_8 \text{H}_6 \text{K}_3 \text{Al}_5 18\text{H}_2\text{O}$	Potasio taranakita	178.7
$(\text{PO}_4)_8 \text{H}_6 (\text{NH}_4)_3 \text{Al}_5 18\text{H}_2\text{O}$	Amonio taranakita	175.5
$\text{PO}_4\text{HCa}$	Fosfato dicálcico anhidro	6.66
$\text{H}_8 (\text{K}, \text{H}) (\text{Fe}, \text{Al})_3 (\text{PO}_4)_6 6\text{H}_2\text{O}$	Cristal innominado	-
$(\text{Fe}, \text{Al})\text{PO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	Compuesto amorfo	~ 33
$\text{PO}_4 \text{HMg}3\text{H}_2\text{O}$	Newberyita	-
$(\text{PO}_4)_8 \text{H}_4 \text{CaAl}_6 20\text{H}_2\text{O}$	Cristal innominado	-
$\text{PO}_4 \text{Al}2\text{H}_2\text{O}$	Variscita	30.5
$(\text{PO}_4)_6 \text{Ca}_{10} (\text{OH})_2$	Hidroxiapatito	111.82

La respuesta de las plantas a la aplicación de fósforo, es diferente si éste se aplica como fosfato monocálcico o como fosfato dipotásico; y aún usando dos sales de un mismo catión (fosfatos mono y dipotásico, por ejemplo), la diferencia en respuesta debe ser notable. Por otra parte, la selección del tipo de fertilizante debe hacerse en base a sus caracte

terísticas; así por ejemplo, se esperaría que la fertilización con fosfato monocálcico resultara más eficiente en suelos alcalinos que en ácidos.

TABLA 8.3 Composición de las soluciones saturadas de los fertilizantes fosfóricos comúnmente usados

	Concentraciones solases			
	pH	P	Cationes incluidos	
Simples				
Fosfato monocálcico $(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{CaH}_2\text{O}$				
STPM	1.48	3.98	1.34	$\text{Ca}^{2+}$
STP	1.01	4.50	1.44	$\text{Ca}^{2+}$
Fosfato monoaménico $\text{PO}_4\text{NH}_4\text{H}_2$	3.47	2.87	2.87	$\text{NH}_4^+$
Fosfato monopotásico $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$	3.99	1.69	1.69	$\text{K}^+$
Superfosfato amónico $\text{PO}_4\text{H}_2\text{NH}_4$	6.25	6.48	10.69	$\text{NH}_4^+$
Fosfato diamónico $\text{PO}_4\text{H}(\text{NH}_4)_2$	7.98	3.82	7.64	$\text{NH}_4^+$
Fosfato dipotásico $\text{PO}_4\text{HK}_2$	10.10	6.10	12.20	$\text{K}^+$
Mezclas				
$(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{CaH}_2\text{O}:\text{ClK}:\text{H}_2\text{O}$	0.60	3.43	1.32	$\text{Ca}^{2+}$
(relación de pesos 4:1:2)			2.50	$\text{K}^+$
$(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{CaH}_2\text{O}:\text{ClNH}_4:\text{H}_2\text{O}$	0.43	2.74	1.12	$\text{Ca}^{2+}$
(relación de pesos 2.3:1:2)			4.06	$\text{NH}_4^+$
$(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{CaH}_2\text{O}:\text{NO}_3\text{NH}_4:\text{H}_2\text{O}$	0.93	3.25	1.32	$\text{Ca}^{2+}$
(relación de pesos 2.3:1:2)			3.25	$\text{NH}_4^+$
$(\text{PO}_4\text{H}_2)_2\text{CaH}_2\text{O}:\text{NO}_3\text{K}:\text{H}_2\text{O}$	0.86	4.00	1.48	$\text{Ca}^{2+}$
(relación de pesos 2.3:1:2)			2.50	$\text{K}^+$

## FIJACION DE FOSFORO

El proceso por el cual los fosfatos solubles, generalmente aplicados en forma de fertilizante, pasan a formas menos solubles a través de su reacción con partículas orgánicas e inorgánicas del suelo, se conoce como retención o fijación de fósforo. Como consecuencia, se restringe la movilidad del fósforo en el suelo y disminuye su posibilidad de ser absorbido por las plantas. (Bear, 1963; Fassbender, 1966).

Han sido propuestos varios mecanismos para explicar la retención de fosfatos. Según Kardos (In Bear, 1963), estos mecanismos son:

- a) Adsorción superficial
- b) Sustitución isomórfica
- c) Reacciones de doble descomposición, que encierran constantes de productos de solubilidad.

### Adsorción superficial

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

Una de estas isotermas es la de Freundlich, cuya fórmula general es:  $y = KC^{1/n}$ ; en donde "y" es el fósforo adsorbido por unidad de peso de suelo; "C" es la concentración de fósforo en la solución de equilibrio; y "K" y "n" son constantes. Esta ecuación es aplicable en un rango an

plio de concentración de fósforo en la solución de equilibrio, pero no permite el cálculo de la máxima capacidad de adsorción.

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

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

en donde:

C = Concentración de fósforo en la solución de equilibrio.

X = Cantidad de fósforo adsorbido por unidad de peso de suelo

K = Constante relacionada con la energía de adsorción

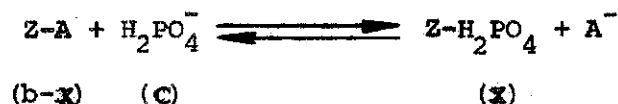
b = Máxima capacidad de adsorción

1/b = Pendiente de la línea

Esta ecuación puede ser deducida de la ley de acción de masas. El siguiente es un ejemplo tomado de Corey (1968), en el que Z representa el complejo coloidal del suelo y A son los aniones adsorbidos al complejo coloidal.

Se considera que  $Z-H_2PO_4$  representa el fósforo adsorbido y equivale a X en la ecuación de Langmuir. Como la máxima capacidad de adsorción (b) está representada no solo por X, sino también por Z-A, esta fase se puede sustituir por (b-X). La concentración de fósforo en la solución de

equilibrio (c) se toma igual a la concentración de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ :



$$K = \frac{\text{A}^-}{c} \cdot \frac{x}{b-x}$$

Al hacer las transposiciones necesarias para despejar  $\frac{c}{x}$  se obtiene la ecuación:

$$\frac{c}{x} = \frac{\text{A}^-}{kb} + \frac{c}{b}$$

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

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

El fósforo adsorbido se calcula como la diferencia entre la concentración de la solución antes y después del contacto con el suelo; con este resultado se calcula el fósforo adsorbido por gramo de suelo ( $\frac{c}{x}$  en la ecuación).

Al graficar la concentración de fósforo en la solución de equilibrio ( $\frac{c}{x}$ ), contra el fósforo adsorbido ( $\frac{c}{x}$ ), resulta una curva como la de la Figura 8.3, en la que se aprecia que hay una máxima capacidad de ad

sorción de fósforo cuando la curva se torna asintótica.

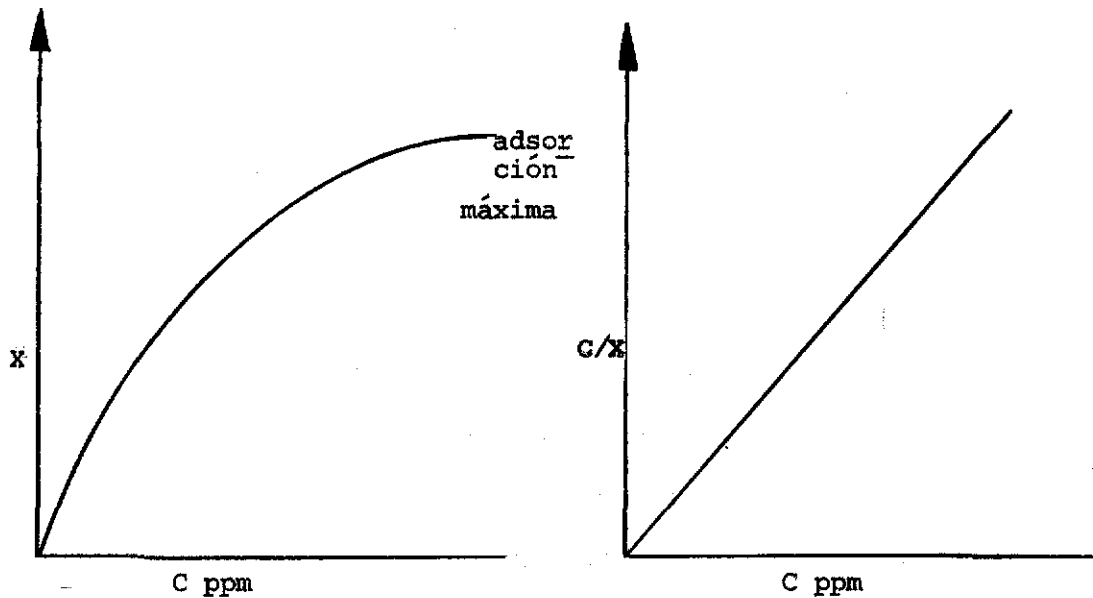


Figura 8.3.- Representación gráfica de la adsorción de fósforo.

Si se grafica  $C/x$  contra  $C$ , se obtiene una línea recta (Figura 8.3 parte derecha), que corresponde a la isoterma de Langmuir. Los valores de  $b$  y  $K$  de la ecuación, se hallan estadísticamente al igualar  $C/x = y$  y  $C = x$ , en la ecuación de la recta ( $y = a + bx$ ).

En investigaciones recientes sobre la adsorción de fosfatos, realizados por Benavides (1974) en suelos de Colombia, se siguió el procedimiento descrito a continuación.

Muestras de 2.5 gramos de suelo tamizado por malla de 1 mm,

se agitaron por duplicado y por 6 horas a temperatura del laboratorio con 25 ml. de una solución de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , con concentraciones variables de P entre 2.5 y 250 p.p.m. Las soluciones fueron ajustadas a pH 7 inicialmente. Después se centrifugó a 3.000 r.p.m, por 30 minutos y en el sobrenadante se determinó fósforo por colorimetría.

Algunos de los resultados obtenidos por Benavides, se presentan en la Figura 8.4 y Tabla 8.4.

Es necesario anotar, que la adsorción es un fenómeno que aumenta a medida que transcurre el tiempo de contacto entre el suelo y la solución y por lo tanto los resultados obtenidos varían con el tiempo de agitación de la muestra. En este sentido Fassbender (1966), al realizar experimentos de adsorción en suelos de Costa Rica, encontró variaciones considerables al repetir el ensayo a diferentes tiempos de agitación. En la Figura 8.5, se presentan las isotermas de adsorción de un Andosol obtenidas en dicho experimento. Se observa que a mayor tiempo de agitación, aumenta la máxima capacidad de adsorción ( $b$ ); hecho que se traduce a una menor pendiente ( $1/b$ ) de la línea.

Algunos suelos ácidos, con alta capacidad para reaccionar con fósforo, no alcanzan el equilibrio por muchos meses. En la práctica debe preferirse un equilibrio aparente de 48 o 72 horas y usar un tiempo patrón para efectos de poder comparar suelos (Pratt, 1966).

Otro factor que debe tenerse en cuenta al hacer experimentos de adsorción de fosfatos, es la clase de sal utilizada; en este senti

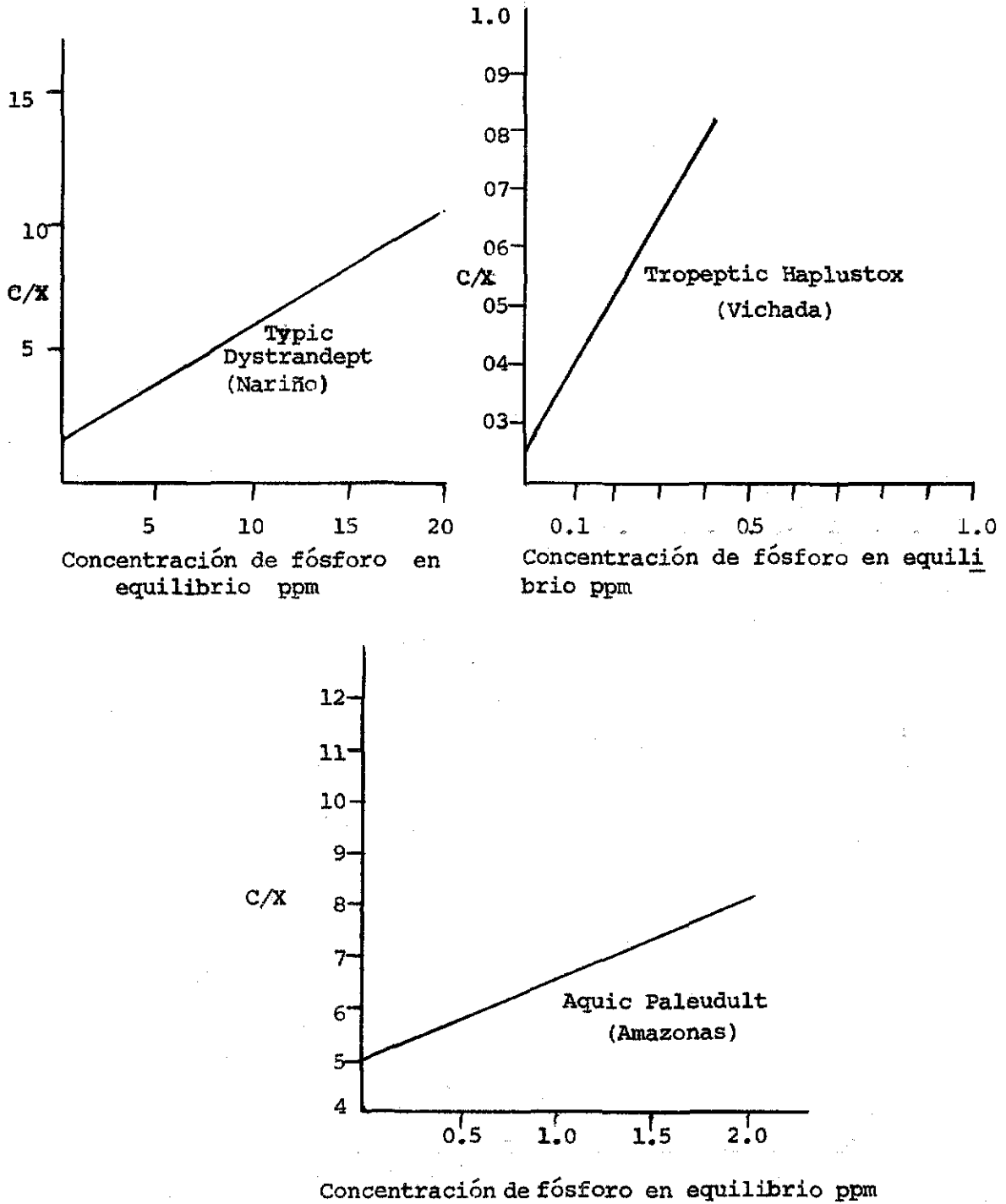
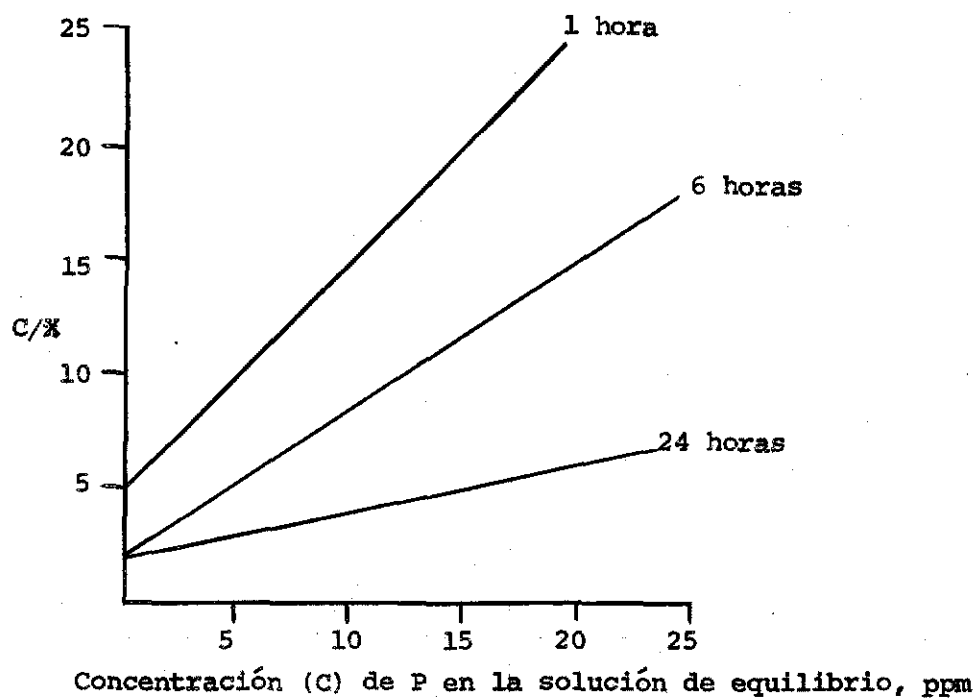


Figura 8.4.- Isothermas de adsorción de P en suelos de Colombia.

TABLA 8.4 Características de los suelos de la Figura 8.4

Suelo	pH	C%	Ar%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Libre %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Amorfo %	SiO <sub>2</sub> Amorfo %	Al <sup>+3</sup> int. me/100 g	Alófanos %
Typic Dystrandept	5.3	8.46	37.07	1.9	5.4	9.2	1.4	25.9
Tropeptic Haplustox	4.7	2.84	53.4	7.2	4.0	6.1	2.3	-
Aquic Paleudult	4.4	1.41	24.0	0.2	1.2	3.1	5.1	-

Figura 8.5.- Efecto del tiempo de agitación en las características de adsorción.

do Fox y Kamprath (1970), recomiendan utilizar  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  en una solución de  $\text{CaCl}_2$  0.01M, por las siguientes razones: 1) el calcio es el catión más abundante en la mayoría de los suelos agrícolas; 2) el pH al momento de equilibrio se aproxima a las condiciones de campo; y 3) se obtiene un líquido sobrenadante claro, lo cual facilita el trabajo en el laboratorio. Por otra parte, los fertilizantes fosfóricos más usados son los fosfatos de calcio.

#### Sustitución isomórfica

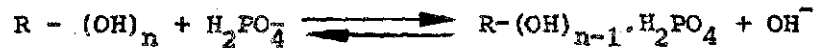
Los iones fosfatos (número de coordinación 4), encajan bien en los sitios ocupados por los tetraedros de silicio de los silicatos. Es de esperarse que cuando se aplican fosfatos al suelo ocurra algún grado de sustitución de fósforo por sílice en los enrejados arcillosos.

Esta teoría fue confirmada por Toth (citado por Kardos, 1963), quien encontró que a medida que aumenta la fijación de fósforo, aumenta la concentración de sílice en el líquido sobrenadante.

Experimentos realizados por Lous y Black (citados por Kardos 1963), indican que la caolinita fosfatada, a 45°C, desprende poca sílice hasta el octavo día, pero después continúa el desprendimiento de sílice hasta los 35 días. Concluyeron que el desprendimiento de sílice hasta el día 14, o cuando se habían desprendido unos 14 mmoles de sílice/100 g de arcilla, era consecuencia de sustitución isomórfica de los tetraedros de silicio por fósforo. Cuando se sobrepasan los límites de sustitución, la arcilla se vuelve inestable y se precipitan nuevos compuestos.

Otra forma de sustitución isomórfica se presenta al inter

cambiarse el ión fosfato, por iones hidroxilo en el enrejado de los minerales. En este caso hay desprendimiento de  $\text{OH}^-$  y el pH tiende a subir. Las siguientes reacciones propuestas por Fox (1973), para hidróxidos de hierro en Oxisoles, ilustran este fenómeno:



En el primer caso se origina  $\text{OH}^-$  y en el segundo  $\text{H}_2\text{O}$  y carga negativa libre. Este fenómeno explica el aumento de carga negativa cuando se fosfatan suelos.

#### Reacciones de doble descomposición

Estas reacciones involucran la formación de precipitados de fosfatos de hierro, aluminio y calcio en los cuales el producto de solubilidad juega papel importante. Este tópico ya fué discutido en este capítulo.

#### FRACCIONAMIENTO DEL FOSFORO

El conocimiento de las formas en que se encuentra el fósforo en los suelos, aún no representa mucha utilidad en el campo de la fertilidad. Una de las razones es que las especies de plantas tienen diferente habilidad para extraer fósforo de los diversos compuestos. Cultivos que se adaptan bien en suelos ácidos, es posible que lo hagan gracias a que poseen suficiente habilidad para extraer fósforo unido al hierro y aluminio, mien

tras que los que crecen mejor en suelos calcáreos, extraen mejor los fosfatos de calcio; sin embargo, falta mucho por investigar.

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

Para el fraccionamiento de fósforo se han usado varias técnicas. Inicialmente se hacía la extracción de fosfatos por medio de ácidos y bases fuertes, sometiendo el suelo a extracciones sucesivas entre pH 1.5 y 12. Si las cantidades de fósforo extraídas a diferentes pH se graficaban, se obtenían curvas como las presentadas por Pratt (1966), en las que el suelo 1 (Figura 8.6), sería aquel con fosfato de calcio, el suelo 2 tiene fosfatos de hierro y aluminio y el 3 posee tanto fosfato de calcio, como de hierro y aluminio.

Los valores de pH de las soluciones extractoras se obtenían por mezcla de diversas proporciones de NaOH y HCl.

El método tiene el inconveniente de no diferenciar entre fosfatos de hierro y aluminio además alguna proporción de éstas formas de fósforo, son solubles en medios ácidos.

Posteriormente Chang y Jackson (1957), propusieron un método

do que usa  $\text{FNH}_4$  a pH 7.0 para extraer fosfatos de aluminio; NaOH para los fosfatos de hierro y  $\text{H}_2\text{SO}_4$  para los fosfatos de calcio. Después de realizar estas tres extracciones en secuencia, se trata el suelo con agentes reductores (ditionito y citrato de sodio), para solubilizar el fósforo oculto (atrapado entre concreciones de hierro y aluminio); en la Tabla 8.5 aparecen los extractantes empleados, junto con la solubilidad en ellos de los fosfatos de aluminio, hierro y calcio, dados por los autores del método.

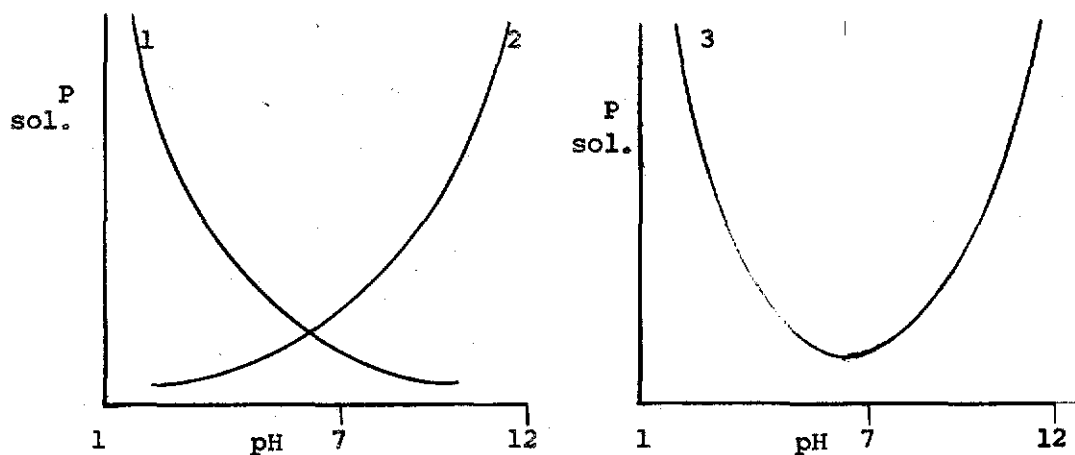


Figura 8.6.- Fósforo extraído a diferentes valores de pH

TABLA 8.5 Solubilidad de variscita, estregita y apatita en varios extractantes

Compuesto	% Solubilidad en		
	$\text{FNH}_4$ 0.5N	NaOH 0.1N	$\text{H}_2\text{SO}_4$ 0.5N
Variscita (P-Al)	100	100	39
Estregita (P-Fe)	3	100	46
Apatita (P-Ca)	1	Trazas	100

El orden en que se usan los extractantes debe ser el de la Tabla 8.5 ya que de lo contrario, no se consigue selectividad por las formas de fósforo. Sin embargo, Lindsay (citado por Pratt, 1966), al realizar el fraccionamiento en algunos compuestos conocidos, encontró problemas en la interpretación de los resultados. En la Tabla 8.6, se da la solubilidad de los fosfatos utilizados por Lindsay.

TABLA 8.6 Solubilidad de P de varios compuestos

Compuesto	% Solubilidad en:		
	$\text{FNH}_4$ 0.5N	NaOH 0.1N	$\text{H}_2\text{SO}_4$ 0.5N
P-Al amorfo	100	-	-
Taranaquita	100	-	-
$\text{K}_2\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$	16	84	-
P-Fe amorfo	20	80	-
$\text{KFeH}_8(\text{PO}_4)_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	20	80	-
Fosfato dicálcico	90	-	10
Fosfato octacálcico	85	-	-
$\text{CaFe}_2(\text{HPO}_4)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	20	60	20

Los datos indican que los resultados de un fraccionamiento son poco confiables, por cuanto las soluciones no son muy selectivas. El  $\text{FNH}_4$  teóricamente debe disolver solamente los fosfatos de aluminio, pero en la práctica una alta proporción de fosfatos de hierro y calcio son extraí

dos con esta solución. Sin embargo, el método de Chang y Jackson fue modificado posteriormente en el sentido de usar  $\text{NH}_4\text{F}$  a pH 8.2, valor éste en el que se minimiza la disolución de fosfatos de hierro y calcio. Otra modificación, consiste en tratar la muestra con los agentes reductores antes de la extracción con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , con lo cual se evita que fosfatos ocluidos de hierro y aluminio se reporten como fosfatos de calcio.

Varios investigadores, entre ellos Tafur y Blasco (1969), Tafur (1969), S. Benavides (1963) y G. de Benavides (1974), han fraccionado el fósforo en los suelos de Colombia. Algunos de los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 8.7.

Los datos muestran que a medida que los suelos son más evolucionados, poseen menores cantidades de fosfatos de calcio y mayores de aluminio y hierro. En los suelos altamente intemperizados, predominan siempre los fosfatos de hierro. Es posible que en los suelos del Cesar el contenido de P-Ca sea aún mayor, si se tiene en cuenta que cuando se hizo el fraccionamiento no se trabajó con las últimas modificaciones propuestas.

Los trabajos más recientes fueron realizados por G. de Benavides (1974), quien utilizó el método modificado de Chang y Jackson, con el siguiente procedimiento:

1 gramo de suelo se extrae con 50 ml de  $\text{ClNH}_4$  1N, se agita por 30 minutos, se centrifuga y se determina el fósforo fácilmente soluble en el líquido sobrenadante. Se agregan 50 ml de  $\text{FNH}_4$  0.5N (pH 8.2), se agita por una hora, se centrifuga y se determina P-Al en el sobrenadante. Se

lava 2 veces con NaCl saturado, descartando el sobrenadante. Se agregan 40 ml de citrato de sodio 0.3M y 5 ml de bicarbonato de sodio 1M; se calienta en baño de maría a 80°C; se agrega lentamente y con agitación rápida 1 g de ditionito de sodio, se continúa el calentamiento por 15 minutos agitando con frecuencia, se centrifuga y se separa el líquido sobrenadante a un balón de 100 ml. Lavar dos veces con NaCl saturado y recoger los sobrenadantes en el mismo frasco volumétrico de 100 ml; el cual se lleva a volumen con H<sub>2</sub>O destilada y se guarda para determinar el fósforo soluble en reductante como se describe más adelante. Al residuo se agregan 50 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.5N, se agita por una hora, se centrifuga y se determina P-Ca en el sobrenadante. Se repiten las extracciones con NH<sub>4</sub>F y NaOH para obtener los fosfatos ocluidos al aluminio y hierro.

Para la determinación del fósforo soluble en reductante se toma una alícuota de 5 ml del balón de 100 ml, se colocan en un frasco cónico de 100 ml, se agregan 10 ml de H<sub>2</sub>O y 10 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> de 30% (medidos exactamente). Se calienta cuidadosamente en mechero (evitando ebullición violenta) moviéndolo cuando sea necesario; se agrega una gota de Cl<sub>3</sub>Fe 0.5 M o 10 ml de solución de hierro de 100 p.p.m., para moderar la oxidación. Cuando cesa la formación de burbujas y se inicia la ebullición ordinaria, es indicio de que la oxidación se ha terminado.

En este momento se adicionan unas gotas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y se calienta en plancha (100-120°C) por uno o dos minutos hasta cerca del punto de cristalización (en ningún momento debe permitirse que la muestra se seque completamente). El secado se efectúa en estufa entre 90-100°C. Agregar 10 ml de NaOH 2N. Hervir por 1 o 2 minutos y digerir en plancha por 5 minutos.

TABLA 8.7 Formas de fósforo (p.p.m.) en el horizonte superficial de algunos suelos de Colombia

Suelo	Localización	pH	M.O. %	Arcilla %	P.total	P.Orgánico	P. Sol.	P-Ca	P-Al	P-Fe	P activo <sup>*</sup>
Promedio de 11 suelos aluviales	Cesar	7.0	1.7	20	414	114	5.7	67	27	49	150
Typic Dystrandept	Nariño	5.2	1.4	25	640	490	trazas	33	49	40	25
Typic Dystrandept	Nariño	5.2	1.6	44	900	720	trazas	29	73	54	38
Aquic Paleudalf	Amazonas	3,8	2.4	24	180	90	trazas	6	13	26	43
Udoxic Dystrandept	Vaupés	4.7	3.4	70	500	250	trazas	21	27	75	130
Tropeptic Haplustox	Vichada	4.9	2.7	25	125	59	0,0	4	11	26	32
Typic Ochraqox	Vichada	4.2	8.3	54	250	118	0,0	10	1	56	59
Oxisol-Carimagua	Meta	4,6	3.9	30	185	138	0,0	2	1	19	20

\* Incluye fósforo ocluido al hierro y al aluminio.

La suspensión se coloca en tubos de centrífuga (con ayuda de 10 ml de H<sub>2</sub>O), para precipitar óxidos de hierro. El líquido sobrenadante se recoge en balones de 50 ml, se lleva a volumen y se determina el fósforo.

Nota: Debido a que la obtención de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> libre de fósforo es dispendiosa y ofrece peligros, se puede trabajar con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> químicamente pura, pero corriendo un blanco para descontar.

El fósforo total se determina mediante fusión de 1 g de suelo con 5 g de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; se disuelve la costra con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, determinando fósforo en esta solución.

Para el fósforo orgánico se calcina un gramo de suelo a 550°C, en mufla por 6 horas; se agregan 50 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.6N, se agita por 6 horas; se toma alícuota y se determina fósforo. El mismo tratamiento se

da a una muestra sin calcinar, para por diferencia entre las dos extracciones, hallar el fósforo orgánico (López, 1960).

#### FOSFORO ORGANICO

Los fosfatos orgánicos representan una fracción importante del fósforo total en el suelo. En la Tabla 8.7, se muestra el contenido de fósforo orgánico de algunos suelos de Colombia. Se aprecia que en casi todos los suelos, esta fracción es mayor del 50% del fósforo total, llegando a un 80% en algunos casos.

Los compuestos orgánicos que contienen fósforo no han sido bien identificados; sin embargo, se sabe que por lo menos hay tres tipos de sustancias importantes:

a) Fitina. Es un término usado para designar sales de calcio y magnesio del ácido fítico, llamadas también fosfatos de Inositol. Estos compuestos representan entre un 30 y 80% del fósforo orgánico del suelo (Kononova, 1966), su fórmula estructural es:

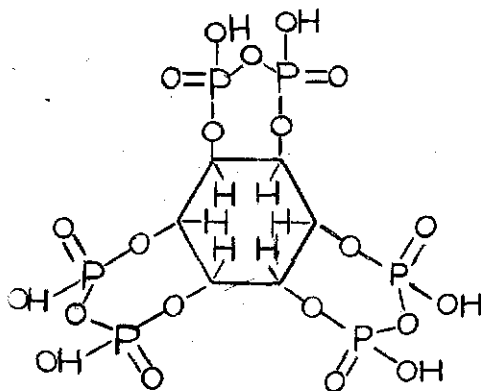


Figura 8.7.- Estructura del fosfato de Inositol

b) Acidos nucleicos. Representan aproximadamente el 10% del fósforo total. Han sido identificados el DNA y el RNA, de origen microbiológico; (Kononova, 1966). Estos ácidos están formados por cadenas de nucleótidos, constituidos por bases nitrogenadas (purinas, pirimidinas), azúcar (Ribosa, Desoxiribosa) y radicales fosfato, siendo uno de los más importantes la Adenosin Trifosfato, derivada de la Adenina e integrante del RNA; su estructura, según Conn (1969) es:

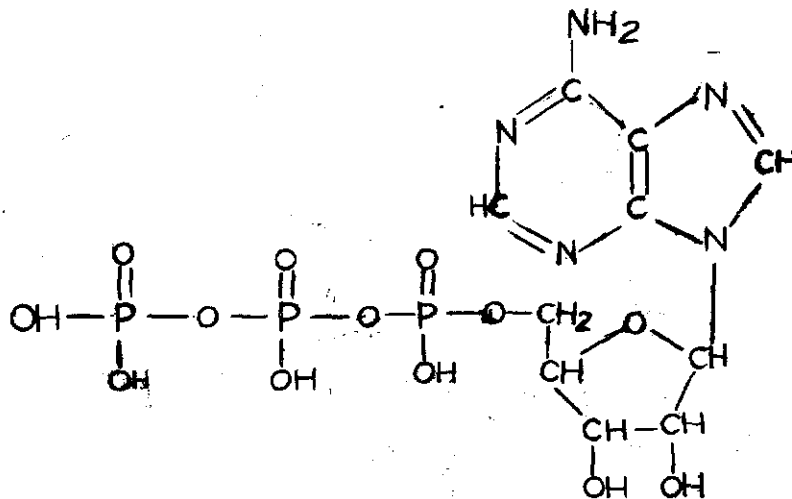


Figura 8.8.- Estructura de Adenosin Trifosfato (ATP)

c) Fosfolípidos. Es la tercera forma de compuestos orgánicos de fósforo en el suelo. Varios investigadores han demostrado su existencia y se ha aislado la colina, un producto de hidrólisis de la Lecitina. En la Figura 8.9 se da la estructura de la molécula de Lecitina (fosfatidil-colina), en la que R1 y R2 representan los ácidos oléico y palmítico, (Conn, 1969).

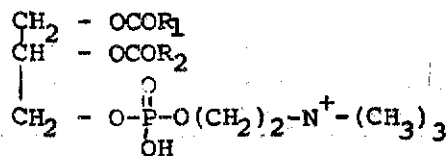
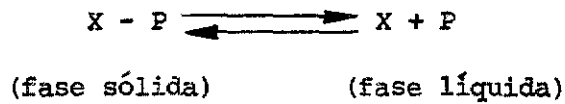


Figura 8.9.- Estructura de la molécula de Lecitina

## APROVECHABILIDAD DEL FOSFORO

Varios factores determinan la cantidad de fósforo que la planta puede tomar en un momento dado. En la literatura se encuentran diversas expresiones, tales como: factor capacidad, factor intensidad, fósforo lábil y valor A, para referirse a este fenómeno.

Si se considera que el fósforo se encuentra en el suelo formando parte de la fase sólida y que para poder ser tomado por las plantas debe pasar antes a la solución del suelo, se puede escribir el siguiente sistema:



Al fósforo en la fase sólida, se le puede considerar como un depósito que va liberando lentamente el elemento a la solución del suelo. De tal manera que la concentración de P en la solución, depende de la cantidad de P en la fase sólida. En otras palabras, para que haya una concentración de P en solución, se requiere una cantidad determinada de P en la fase sólida.

Se define como factor capacidad a la cantidad de P que se requiere en la fase sólida para mantener una cantidad dada de P en la solución del suelo. Se expresa en ppm o % de saturación aniónica. La cantidad de P en la solución del suelo se define como el factor intensidad. Las plantas tienen distintos requerimientos de intensidad para alcanzar su desarrollo.

llo óptimo. Este valor puede variar con el contenido de humedad, con las especies y aún con su estado de desarrollo. Algunas especies crecen bien con valores de 0.03, pero otras requieren 25 veces más. Los valores más usados están entre 0.2 y 0.3 ppm. En la Tabla 8.8 (tomada de Benavides, 1974), se dan las cantidades de P necesarias para obtener una intensidad de 0.2 y 0.3 ppm en la solución del suelo.

TABLA 8.8 Adsorción de P requerida para mantener una intensidad de 0.2 y 0.3 ppm en solución y máxima capacidad de adsorción.

Suelo	P requerido en:				Máxima capacidad de adsorción
	ppm		% Saturación		
	0.2	0.3	0.2	0.3	
Dystrandept	160	250	6.5	10.3	2.450
Dystrandept	134	196	5.8	8.5	2.320
Tropudalf	60	88	4.3	6.2	1.410
Eutrandept	0	0	0	0	400

Los datos de la Tabla 8.8, indican que a medida que los suelos tienen más alta capacidad de retención de P, se necesita un factor capacidad más alto para mantener la misma intensidad de P en solución y proporcionar el fósforo necesario para los cultivos.

La velocidad con que el fósforo pasa de la fase sólida a la solución, es una característica que depende del suelo y se denomina Factor rata.

Por otra parte, el fósforo adsorbido por las plantas depende no solo de la concentración de P en la solución (factor intensidad), sino de la velocidad con que el fósforo se mueve de la solución hacia la raíz.

El fenómeno por el cual los nutrientes se mueven hacia la raíz, obedece a un gradiente de concentración entre la parte de la solución próxima a la raíz y la parte más lejana a ésta, debido al agotamiento del P por absorción, por la planta. En esta forma el P se mueve de la parte más concentrada a la más diluída y el fenómeno que causa este movimiento, se llama difusión.

La cantidad del elemento que se difunde a través del tiempo está afectada por: diferencia en concentración, el espacio por recorrer, contenido de humedad del suelo y la tortuosidad del camino a recorrer. La siguiente expresión, desarrollada con base en las leyes que rigen la conducción del calor, se aplica en este caso:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \left[ D \cdot \gamma (L/L_e)^2 \Theta \right] \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

En que:

$\left[ D \cdot \gamma (L/L_e)^2 \Theta \right]$  es el coeficiente de difusión en espacios porosos

$\Delta Q$  = cantidad del elemento

$\Delta t$  = tiempo

$\Delta C$  = concentración

$\Delta x$  = espacio

$\gamma$  = actividad iónica

$\Theta$  = contenido de agua en volumen

$(L/Le)^2$  = factor de tortuosidad

La cantidad (q) de fósforo tomado por la planta depende del radio de la raíz (a); de un factor de capacidad (b), expresado como la relación entre los mg de P adsorbidos por  $\text{cm}^3$  de suelo y los mg de P por  $\text{cm}^3$  de solución; de la concentración inicial de fósforo ( $C_0$ ) y la concentración de fósforo al pie de la raíz ( $C_r$ ):

$$q = ab (C_0 - C_r) \left[ \frac{2}{\pi} T^{1/2} + 1/2 T \dots \dots \right]$$

en donde:

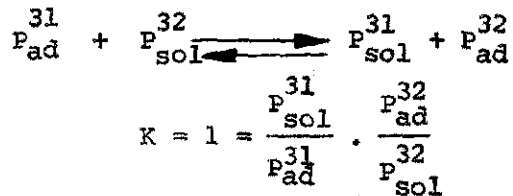
$T = \frac{D_p \cdot t}{a^2 b}$ , siendo  $D_p$  el coeficiente de difusión y t el tiempo respectivamente.

### Fósforo lábil

Se da este nombre al fósforo adsorbido superficialmente, que se intercambia con fósforo radioactivo ( $P^{32}$ ) durante un contacto de 48 horas. Este fósforo representa un porcentaje de la adsorción máxima (b). Se ha encontrado buena correlación entre este valor y la disponibilidad de fósforo.

La determinación del fósforo lábil se hace mediante el uso del Isótopo radioactivo  $P^{32}$ . Se pone el suelo en contacto con solución de  $P^{32}$  por 48 horas, al cabo de las cuales se determina en el sobrenadante, P total y  $P^{32}$  (Pratt, 1966).

La siguiente reacción tiene lugar:



$${}^{31}\text{P}_{\text{ad}} = \frac{{}^{31}\text{P}_{\text{sol}} \cdot {}^{32}\text{P}_{\text{ad}}}{{}^{32}\text{P}_{\text{sol}}} = \text{P lábil}$$

El  ${}^{32}\text{P}_{\text{sol}}$  se determina por conteo de radioactividad; el  ${}^{31}\text{P}_{\text{sol}}$  es la diferencia entre el P total en solución y  ${}^{32}\text{P}_{\text{sol}}$ ; el  ${}^{32}\text{P}_{\text{ad}}$  es la diferencia entre el  ${}^{32}\text{P}$  agregado y el  ${}^{32}\text{P}_{\text{sol}}$  después del equilibrio.

Valor A. Se refiere a la cantidad de fósforo aprovechable en el suelo. Para determinarlo se aplica al suelo fertilizante con  ${}^{32}\text{P}$ , se hace crecer un cultivo y se determina foliarmente P total y  ${}^{32}\text{P}$ , cuya diferencia es el  ${}^{31}\text{P}$  proveniente del suelo (Tisdale and Nelson, 1968).

Si "B" es el P aprovechable en el fertilizante, "I" el P total en la planta "Y" el P proveniente del fertilizante, I-Y será el P proveniente del suelo.

La siguiente proporción se cumple:

$$\frac{\text{P aprovechable en el suelo}}{\text{P aprovechable en el fertilizante}} = \frac{\text{P proveniente del suelo}}{\text{P proveniente del fertilizante}}$$

$$\frac{A}{B} = \frac{I - Y}{Y}, \text{ de donde}$$

$$A = B \frac{(I - Y)}{Y}, = B \left( \frac{I}{Y} - 1 \right)$$

Los factores y parámetros discutidos están relacionados entre sí. En las Figuras 8.9 a 8.12 se dan algunas de estas relaciones.

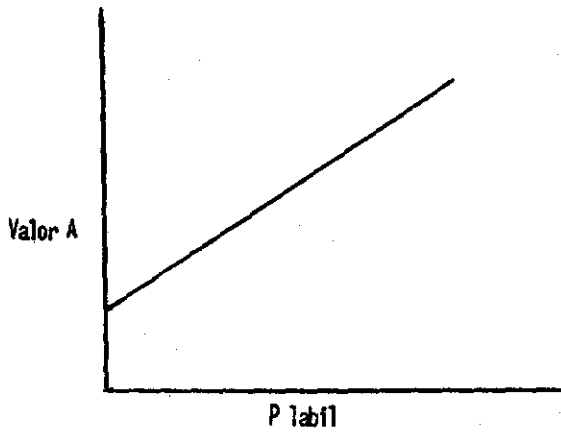


Figura 8.9.- Relación entre valor A y P labil

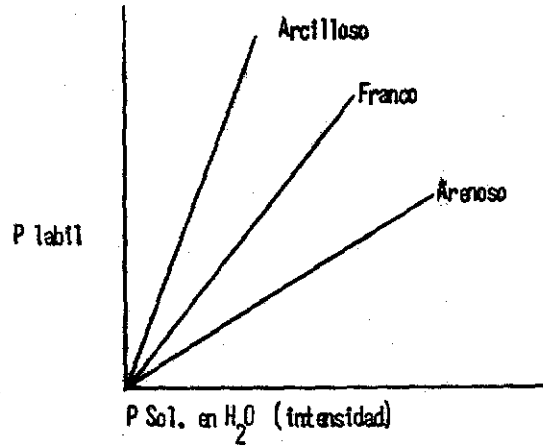


Figura 8.10.- Relación entre P labil, P<sub>sol</sub> en H<sub>2</sub>O y textura.

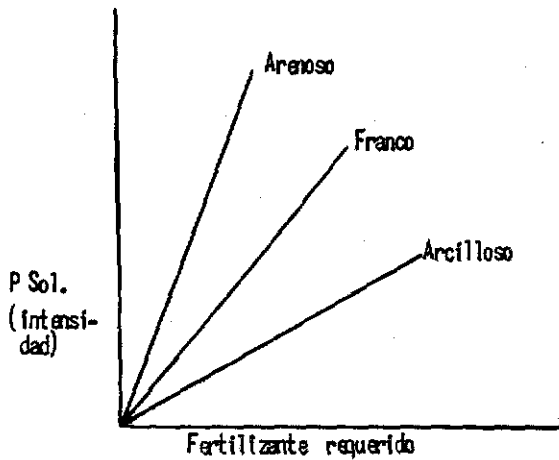


Figura 8.11.- Fertilizante necesario para obtener una intensidad, en suelos de diversa textura.

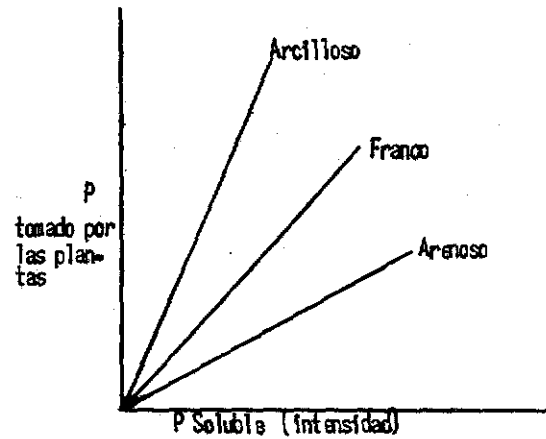


Figura 8.12.- Efecto de la textura sobre el P tomado por las plantas a varios valores de intensidad.

## ANÁLISIS DEL FOSFORO DISPONIBLE

Se han utilizado muchos métodos para evaluar la disponibilidad de fósforo para los cultivos. Estos métodos varían en el tipo de solución empleada para extraer el elemento del suelo.

Dentro de las soluciones extractoras usadas se distinguen dos tipos: 1) aquellas que contienen ácidos; y 2) soluciones alcalinas. Las primeras son eficaces para extraer los fosfatos de calcio, mientras que las segundas disuelven mejor los fosfatos de hierro y aluminio. Por esta razón, las soluciones ácidas se adaptan mejor en suelos ácidos, donde la disponibilidad de fosfato depende principalmente de los compuestos con calcio; las soluciones alcalinas deben usarse en suelos de pH alto para no disolver fósforo apatítico, el cual en este pH es muy insoluble. Sin embargo, cualquier método puede considerarse bueno, siempre que esté calibrado con la respuesta de los cultivos a la aplicación de fertilizantes.

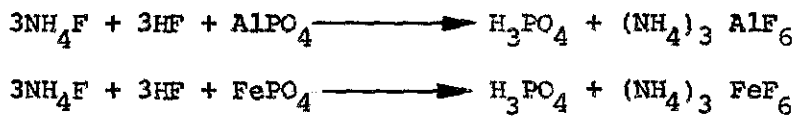
En un estudio sobre calibración de métodos en suelos de Colombia (Navas et al, 1968), se ensayaron 9 procedimientos y se buscaron correlaciones con la respuesta, en invernadero y campo, a la aplicación de fertilizantes fosfóricos. Los métodos utilizados y algunos de los resultados y conclusiones se describen enseguida:

1. Método de Olsen. Este método emplea una solución 0.5N de  $\text{NaHCO}_3$  a un pH de 8.5. Es muy recomendable para la extracción del fósforo en suelos calcáreos.

2. Método Bray I (Bray y Kurtz). La solución extractora utilizada es

te método es una mezcla de  $\text{NH}_4\text{F}$  0.03N y  $\text{HCl}$  0.025N.

El ión  $\text{F}^-$  tiene la propiedad especial de formar complejos con los iones  $\text{Al}^{+++}$  y  $\text{Fe}^{+++}$  en soluciones ácidas, con la consecuente liberación del fósforo retenido en el suelo por estos iones trivalentes. La reacción en solución ácida puede representarse así:



La fórmula  $\text{AlPO}_4$  representa diferentes fosfatos de Al. La fórmula  $\text{FePO}_4$ , similarmente representa varios fosfatos de Fe. La reacción con el  $\text{FePO}_4$  no es completa, debido a las concreciones o al óxido de Fe que cubre el  $\text{FePO}_4$ .

3. Método de Bray II (Bray y Kurtz, No. 2, para fósforo soluble en ácido y el adsorbido). En este método se usa una solución extractora similar a la anterior, pero con  $\text{HCl}$  0.1N, con el fin de incluir una mayor cantidad de fósforo proveniente de la apatita del suelo.

4. Método de Truog. En este método se usa una solución extractora de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.002N taponada a pH 3 con  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  o  $\text{K}_2\text{SO}_4$ .

5. Método de Bingham. En este método se usa agua destilada como solución extractora, agitando por 5 minutos y usando una relación suelo-solución de 1:10. Esta solución extrae únicamente el fósforo soluble en agua, lo que indica que no es aconsejable para suelos ácidos.

6. Método de Carolina del Norte. En este caso se utiliza una mezcla de HCl 0.05N +  $H_2SO_4$  0.025N con una relación suelo-solución 1:4 y agitando por 5 minutos. Este método puede ser incluido en la categoría de los que usan extractores con ácidos fuertes. Se agrega  $H_2SO_4$  al HCl con el fin de aumentar la cantidad de fósforo extraído en suelos que contienen fosfatos adsorbidos.

7. Método de Sapin y White. El método utiliza una solución de HCl 0.75N , una relación suelo-solución 1:7,5 y un tiempo de agitación de 2 minutos. Este método también está incluido dentro de los que usan extractores provenientes de ácidos fuertes y como todos ellos, está sometido a limitaciones pues extrae fósforo de formas menos aprovechables para las plantas.

8. Método de Peach-English. Este procedimiento es una modificación al método original de Morgan en el cual se usa una solución extractora de ácido acético diluido, taponado con acetato de sodio a un pH de 4.8. La relación suelo-solución es de 1:5 y un tiempo de agitación de 30 minutos.

9. Método de Walker y Adams. (Determinación de fósforo orgánico en suelos). Aquí se usan dos muestras de suelo, una de las cuales se calcina en la mufla a  $550^{\circ}C$  por una hora. Las dos muestras se agitan por 16 horas con una solución de  $H_2SO_4$  1N, usando una relación suelo-solución de 1:50. La diferencia entre el fósforo encontrado en la muestra calcinada y el de la muestra sin calcinar, da el contenido de fósforo orgánico de la muestra.

El método que mejor correlación mostró con la respuesta de los cultivos en el campo fue el de Bray II. Este método ofrece una manera

satisfactoria de determinar la necesidad de aplicación de fertilizante fosfórico.

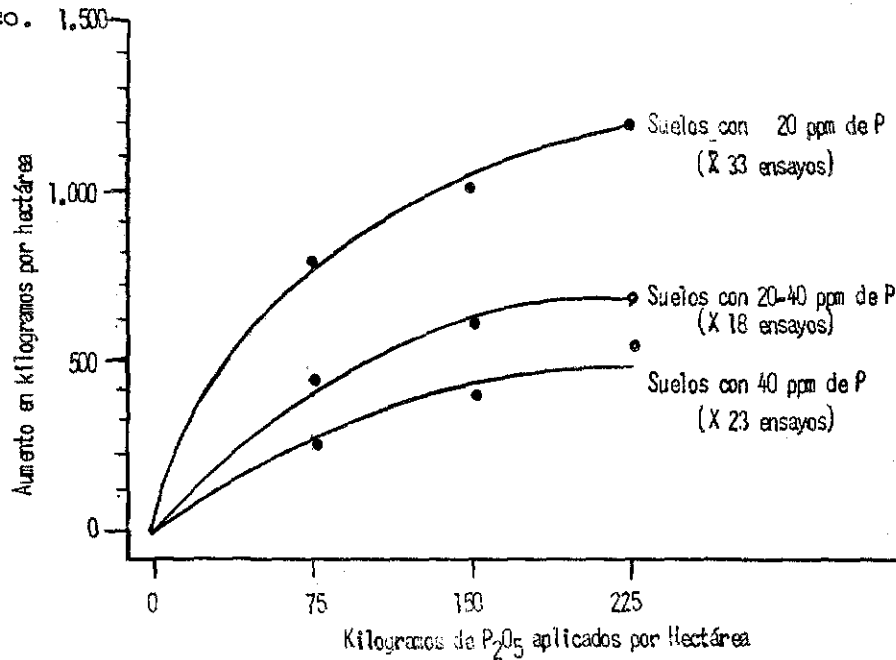


Figura 8.13.- Aumento de la producción del trigo con la aplicación de fósforo y su relación con el contenido de este elemento en el suelo, según Bray II.

En la Figura 8.13 se muestra la respuesta del trigo a la aplicación de fósforo para 3 niveles de este elemento en el suelo. Se observa que suelos con más de 40 ppm de P responden poco a la aplicación de fertilizantes, por lo cual este nivel se considera alto; cuando el contenido es menor de 20 ppm la respuesta es alta, considerando este valor como baja

Posteriormente, después de realizar más investigaciones el Programa de Suelos del Instituto Colombiano Agropecuario, ha establecido los límites de 15, 15-30 y mayor de 30 ppm de P para considerar como bajo, medio o alto el contenido en este elemento determinado por el método de Bray II.

Para la determinación cuantitativa del fósforo extraído por cualquiera de los métodos, se emplea la colorimetría (métodos de adsorción capítulo II). Generalmente se usa el color azul desarrollado por la reducción con cloruro estannoso ( $\text{Sn Cl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) del complejo fosfo-molibdico formado por la adición de molibdato de amonio a una alícuota del extracto que contiene el fósforo. La intensidad del color depende de la concentración de fósforo. La lectura se hace en un colorímetro con longitud de onda de 660 milimicras.

#### BIBLIOGRAFIA

- BEAR, F.E. 1963. Química del suelo. Edición Interciencia. Madrid. 435 p.
- BENAVIDES, S.T. 1963. Distribution of native phosphorus and phosphorus sorption capacity of some Tropical Soil of Colombia. M.S. Thesis. Oklahoma State University.
- BENAVIDES, G. DE. 1974. Retención de fosfatos en suelos volcánicos de Nariño, Colombia. Agricultura Tropical. 17 (3): 5-19.
- \_\_\_\_\_. 1974. Retención de fosfatos en algunos suelos de Gaviotas, Viacha, Colombia. (Sin publicar).
- COLLIS, G. et al. 1971. Suelo, atmósfera y fertilizantes. Fundamentos de Agricultura Moderna. Edit Aedos. Barcelona. 334 p.
- CONN, E. y F.K. STUMPF. 1962. Bioquímica Fundamental. 2a. ed. Edit. Limusa, México. 479 p.
- COREY, R. 1968. Química de suelos. Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Post-Graduados. Chapingo, México. 165 p. (Mimeografiado).
- CHANG, S.C. y M.L. JACKSON. 1957. Fractionation of Soil phosphorus. Soil Sci. 84: 133-134.
- FASSBENDER, H.W. 1966. Adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. Fitotecnia Latino

americana. 3: 203-216.

FOX, R.L. y KAMPRATH. 1970. Phosphate sorption Isotherms for Evaluating the phosphate requirements of soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34: 902-907.

\_\_\_\_\_. 1973. Phosphorus of Oxisols. In El fósforo en suelos Tropicales. III Coloquio sobre suelos. Bogotá. (Sin publicar).

KARDOS, L.T. 1963. Fijación de Nutrientes Vegetales en el suelo. In Bear, F.E. Química del suelo. Edit. Interciencia. Madrid. 435 p.

KONONOVA, M.M. 1966. Soil Organic matter. 2a. ed. en Inglés. Edit. Pergamon, New York. 544 p.

LOPEZ, M. 1960. Valoración de las formas de fósforo orgánico e inorgánico, de un suelo de la zona cafetera colombiana. Cenicafé. 189-204.

NAVAS, J., H. MANZANO y A. McCLUNG. 1968. Algunos aspectos del análisis de suelos. ICA, Boletín de Divulgación 16: 27-36.

PRATT, P.F. 1966. Química do solo. 88 p. (Mimeografiado).

TAFUR, N. 1969. Fraccionamiento del fósforo en algunos suelos del Valle del Sinú. Revista ICA. 4 (2): 59-71.

\_\_\_\_\_ y M. BLASCO. 1969. Fósforo en los suelos de Valledupar. Agricultura Tropical. 3: 153-161.

TISDALE, S.L. and WERNER, L. N. 1968. Soil Fertility and Fertilizers. - 2a. ed. Edit. MacMillan. New York. 649 p.