

504

EFFECTO DEL ENCALAMIENTO EN LA ACIDEZ Y DIFERENTES  
FORMAS DE FOSFORO DE UN SUELO DE LOS LLANOS  
ORIENTALES DE COLOMBIA 1.971

945

LE  
41  
. 176h  
G I  
TESIS

EFFECTO DEL ENCALAMIENTO EN LA ACIDEZ Y DIFERENTES FORMAS  
DE FOSFORO DE UN SUELO DE LOS LLANOS ORIENTALES DE  
COLOMBIA

POR: ✓  
FERNANDO GIL

Tesis de Grado presentada como requisito parcial  
para optar al título de Magister Scientiae

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-ICA,  
PROGRAMA DE GRADUADOS  
BOGOTA, 1971.

COMITE CONSEJERO:

ALFREDO LEON S.,	Ph.D.	<u>Alfredo Leon</u>
A. HUGO MANZANO,	Ph.D.	<u>Hugo Manzano</u>
RAMIRO GUERRERO M.,	Ph.D.	<u>Ramiro Guerrero</u>

"El presidente de tesis y el consejo examinador de grado, no serán responsables de las ideas emitidas por el candidato".

(Artículo 217 de los estatutos de la Universidad Nacional).

## A G R A D E C I M I E N T O S

Muy profundos a los doctores Alfredo León Sarmiento,  
Alejandro Hugo Manzano, Jaime Navas Alvarado, Rodrigo  
Lora Silva y Ramiro Guerrero Muñoz.

A la Señorita Carmenza Rodríguez M.

Igualmente al Instituto Colombiano Agropecuario ICA, en  
especial al Programa de Suelos, sin cuya colaboración  
hubiera sido imposible la realización de este estudio.

## INDICE DE CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCION .....	1
2. REVISION DE LITERATURA .....	3
2.1. LA ACIDEZ DEL SUELO .....	3
2.2. EFECTO DEL ENCALADO EN SUELOS TROPICALES MUY METEORIZADOS .....	6
2.3. EL FOSFORO TOTAL EN EL SUELO .....	8
2.4. EL FOSFORO ORGANICO .....	8
2.4.1. El fósforo orgánico en el suelo y algunos factores que lo afectan .....	10
2.4.2. El fósforo orgánico y la acidez del suelo.	12
2.5. EL FOSFORO INORGANICO .....	13
2.5.1. Fósforo soluble en agua y fácilmente resem- plazable .....	14
2.5.2. Fósforo soluble en ácidos débiles .....	14
2.5.3. Fósforo unido al aluminio .....	15
2.5.4. Fósforo unido al hierro .....	17
3. MATERIALES Y METODOS .....	18

3.1. EXPERIMENTO No. 1 .....	20
3.2. EXPERIMENTO No. 2 .....	21
3.3. EXPERIMENTO No. 3 .....	22
3.4. EXPERIMENTO No. 4 .....	23
3.5. PROCEDIMIENTOS Y ANALISIS DE LABORATORIO .....	23
3.5.1. El pH .....	23
3.5.2. Aluminio Intercambiable .....	24
3.5.3. Determinación de fósforo .....	24
3.5.3.1. Método de Bray II .....	24
3.5.3.2. Método de Olsen .....	24
3.5.3.3. Método de Truog .....	24
3.5.3.4. Fraccionamiento de Fósforo .....	24
3.6. ANALISIS DE TEJIDO VEGETAL .....	25
4. RESULTADOS Y DISCUSION .....	26
4.1. EXPERIMENTO No. 1 .....	26
4.1.1. Cantidades de fósforo encontradas .....	26
4.1.2. Efecto de la cal en el fósforo nativo ...	26
4.1.3. La acidez del suelo y su relación con el- encalamiento y aluminio intercambiable .	28
4.2. EXPERIMENTO No. 2 .....	30
4.2.1. Relaciones del encalamiento y/o las apli- caciones de fósforo con la acidez del suelo .....	30

4.2.2. Efecto del encalado en las diferentes formas de fósforo .....	36
4.3. EXPERIMENTO No. 3 .....	47
4.3.1. Efecto de la siembra en la acidez del suelo .....	48
4.3.2. Efecto de la siembra en las diferentes formas de fósforo .....	50
4.3.2.1. En el fósforo orgánico .....	50
4.3.2.2. En el fósforo mineral .....	51
4.3.3. Efecto del encalado en los rendimientos y/o absorción de Ca y P por la planta ..	55
4.4. EXPERIMENTO No. 4 .....	56
4.4.1. Efecto del encalado en la acidez del sue <u>l</u> o previamente tratado con fósforo .....	57
4.4.2. Efecto de la época de aplicación de cal en las diferentes formas de fósforo .....	58
5. CONCLUSIONES .....	64
6. RESUMEN .....	67
BIBLIOGRAFIA .....	69

## CONTENIDO DE CUADROS

Cuadro No.		Página
1	Algunas características físico-químicas de los suelos de Carimagua .....	19
2	Efecto del Carbonato de Calcio (3 y 6 toneladas/hectárea) y la incubación en las diferentes formas de fósforo nativo .....	27
3	Ecuaciones de regresión y coeficientes de correlación entre aluminio intercambiable y el pH del suelo	31
4	Ecuaciones de regresión y coeficientes de correlación entre el pH y el aluminio intercambiable de los suelos tratados con fósforo .....	34
5	Efecto del encalamiento en los fosfatos de hierro y aluminio .....	35
6	Efecto del encalado en el fósforo extraído por diferentes métodos .....	39

7	Efecto del encalamiento en la formación y variaciones del fósforo orgánico .....	43
8	Efecto del encalamiento en la formación y cambios del fósforo apatítico .....	46
9	Efecto de la siembra en el pH medido en agua. Relación Suelo-Agua (1:1) por volúmen .....	48
10	Efecto de la siembra en el pH medido en KCl 1N relación Suelo-KCl 1N (1:1) por volúmen .....	49
11	Efecto de la siembra en el aluminio intercambiable del suelo .....	49
12	Efecto de la siembra en el fósforo orgánico .....	50
13	Efecto de la siembra en el fósforo fácilmente reemplazable .....	51
14	Efecto de la siembra en el fósforo unido al calcio no apatítico .....	52

Cuadro No.		Página
15	Efecto de la siembra en el fósforo unido al aluminio	52
16	Efecto de la siembra en los fosfatos unidos al hierro .....	53
17	Efecto de la siembra en el fósforo aplicado .....	53
18	Efecto de la siembra en el fósforo total, mineral y el extraído por varios métodos analíticos .....	54
19	Efecto de la aplicación de cal y/o fósforo en los rendimientos y absorción de calcio y fósforo por la planta .....	55
20	Efecto del encalado en el aluminio intercambiable del suelo previamente tratado con fósforo .....	57
21	Efecto del encalado en el pH (Suelo-Agua 1:1 por Vol.) del suelo previamente tratado con fósforo .....	57
22	Efecto del encalado en el pH (Suelo-KCl 1:1 por Vol.) del suelo previamente tratado con fósforo .....	58

23	Influencia de la época de aplicación de cal (3 toneladas/hectárea), sobre algunas fracciones de fósforo en el suelo .....	61
24	Influencia de la época de aplicación de cal (6 toneladas/hectárea), sobre algunas fracciones de fósforo en el suelo .....	62

## CONTENIDO DE FIGURAS

Figura No.		Página
1	Efecto del encalamiento en la acidez del suelo .....	29
2	Efecto del encalamiento (3 toneladas/hectárea de CaCO <sub>3</sub> ) y las aplicaciones de P (350 p.p.m.) en el pH y contenido de aluminio intercambiable .....	32
3	Efecto del encalamiento (6 toneladas/hectárea de CaCO <sub>3</sub> ) y las aplicaciones de P (350 p.p.m.) en el pH y contenido de aluminio intercambiable .....	37
4	Efecto de las aplicaciones de P y Cal en Al <u>intercam</u> biable y pH determinado con KCl 1N .....	38
5	Efecto del encalado en el P extraído por el método de Bray II .....	40
6	Efecto de la cal en el P extraído por el método de Olsen .....	41

Figura No.		Página
7	Efecto del encalado en el fósforo extraído por el método de Truog .....	42
8	Efecto del encalamiento en el fósforo orgánico .....	44
9	Variaciones del pH y aluminio intercambiable aplicando cal 15 días después de aplicar 350 p.p.m. de fósforo .....	59
10	Variaciones del pH y aluminio intercambiable aplicando cal 15 días después de aplicar 350 p.p.m. de fósforo .....	60

## 1. INTRODUCCION

La región de los Llanos Orientales está considerada como una zona potencial para el desarrollo agropecuario de Colombia. Actualmente cuenta con algunas industrias ya establecidas como la arrocera y ganadera que constituyen un aporte a la economía del país (34).

Tal vez uno de los factores limitantes en el desarrollo agronómico de dicha zona es la acidez del suelo y su baja fertilidad.

Es bien sabido que las aplicaciones de cal juegan un papel importante en la obtención de buenas cosechas, especialmente en suelos ácidos, no solo por su acción correctiva, sino también porque es fuente nutricional de calcio y en algunas ocasiones aumenta la disponibilidad y aprovechabilidad de muchos nutrientes como el fósforo.

El fósforo es un elemento esencial para las plantas y generalmente su contenido en suelos tropicales sometidos a intensa lixiviación es relativamente bajo.

Es necesario investigar las diferentes formas como se presenta este elemento en el suelo y su relación con la práctica del encalamiento, considerada indispensable para la producción de cultivos en algunos suelos ácidos.

El presente trabajo tuvo como objetivos los siguientes:

1. Evaluar el efecto de las aplicaciones de carbonato de calcio y/o fósforo en el pH, aluminio intercambiable y disponibilidad de fósforo en los suelos de la antillanura de los Llanos Orientales de Colombia.

2. Valorar las transformaciones del fósforo aplicado y su relación con las aplicaciones de cal.

3. Identificar las formas de fósforo que pueden suministrar en forma apreciable este nutriente a la planta, y correlacionarlas con el fósforo extraído por los métodos analíticos de Bray II, Olsen y Truog.

## 2. REVISION DE LITERATURA

### 2.1. LA ACIDEZ DEL SUELO.

Hace ya algunos años los químicos de suelos estaban orientados preferencialmente a preparar suelos y arcillas ácidas por electrodiálisis, para luego titularlas con bases y así obtener curvas de titulación que sirvieran para caracterizar el suelo como un ácido débil o fuerte, estableciendo así los requerimientos de cal. Se pensaba que los coloides ácidos obtenidos estaban saturados de iones hidrógeno y que las arcillas, lo mismo que el complejo orgánico del suelo, formaban un grupo de ácidos débiles cuyas cargas negativas estaban neutralizadas por iones hidrógeno y cationes de cambio como calcio, magnesio y potasio. Más tarde otros autores (56), comprobaron que los coloides saturados de hidrógeno se comportaban como ácidos fuertes y los saturados con aluminio como ácidos débiles.

Hoy día, el concepto de acidez no solo está relacionado con la concentración de iones hidrógeno, sino también con el porcentaje de saturación de bases, el contenido de aluminio intercambiable (principalmente), y la presencia de otros elementos como el hierro y el manganeso (70). Por otra parte, se sabe que en la mayoría de los suelos ácidos, el aluminio y no el hierro es el elemento que predomina en el complejo de cambio, el cual mediante reacciones de hidrólisis provoca condiciones de acidez en el suelo (42). No -

obstante, Cervantes, León y Marín (19), demostraron que aparte del aluminio intercambiable existen otros factores no muy bien definidos que afectan el pH de los suelos ácidos de los Llanos Orientales.

El pH en sí, según algunos autores, no es un factor que tenga influencia directa en el desarrollo de los cultivos (56, 70). Arnon et al (5) y otros autores, han demostrado que muchos cultivos pueden crecer bien en soluciones nutritivas balanceadas con pH-s entre 4.0 y 8.0; no obstante, hay un efecto indirecto relacionado con otras condiciones del suelo tales como disponibilidad de nutrientes, actividad microbiana con todos sus efectos colaterales sobre la materia orgánica y el balance nutricional del suelo. También, es de anotar la relación que puedan tener con la toxicidad para las plantas, elementos como el aluminio y el manganeso. La utilidad del valor del pH depende del grado de correlación que este guarde con muchas de las propiedades del suelo (70). Altas concentraciones de aluminio, hierro y manganeso solubles, asociadas con la acidez del suelo, se han encontrado como deprimentes en el desarrollo de muchos cultivos (56, 69).

Randall y Vose (67), establecieron que el efecto principal de la toxicidad del aluminio en raygrass consistía en inhibir los procesos de fosforilación y metabolización del fósforo; la planta tomaba el fósforo pero este se acumulaba en la raíz bajo complejos

con el aluminio que no podían ser metabolizados. Parece que este tipo de toxicidad es general para muchas gramíneas ya que otros autores han encontrado efectos semejantes en cereales, pasto, sorgo, etc. (21, 22, 67). Clarkson (21), obtuvo resultados en donde el aluminio en el suelo, aumentaba la cantidad de fósforo absorbido por las raíces de la cebada; pero dicho fósforo no era incorporado en los procesos de fosforilación para la síntesis de azúcares, lo cual se traducía en una deficiencia de este elemento para la planta. Wright y Donahue (91) encontraron resultados muy parecidos en avena.

No obstante, la toxicidad del aluminio no es similar en todo tipo de plantas; vimos anteriormente que en las gramíneas el efecto se traducía en una acumulación de fósforo en la raíz. Sin embargo, otros autores (27, 28), han encontrado todo lo contrario en algodón (Gossypium hirsutum), en donde el efecto de aluminio se manifiesta en una menor absorción de fósforo por las raíces. Los mismos autores observan que concentraciones de aluminio en el suelo de 2.5 a 3.0 m.e./100 gramos de suelo, eran suficientes para producir toxicidad, la cual disminuía con las aplicaciones de cal. Ríos y Pearson (69) establecen que concentraciones mayores de 0.5 p.p.m. de aluminio en soluciones nutritivas, eran suficientes para producir toxicidad en el algodonero.

La actividad de los microorganismos del suelo, aparentemente se ve afectada desfavorablemente por el contenido de aluminio. Así

pues, Mutatkar y Pritchett (60) en estudios sobre latosoles ácidos y estimando la actividad microbiana por la síntesis de  $\text{CO}_2$ , encuentran que concentraciones de aluminio en el suelo, menores de 1 p.p.m., afectan desfavorablemente dicha actividad; no obstante, los autores no logran aclarar si el efecto se debe directamente al aluminio o a la concentración de iones  $\text{H}^+$ .

## 2.2. EFECTO DEL ENCALADO EN SUELOS TROPICALES MUY METEORIZADOS.

El efecto del encalado sobre la acidez de los suelos y muchas de las propiedades físico-químicas con ella asociadas, ha sido uno de los puntos más discutidos en la ciencia del suelo. Tal vez, el dinamismo con que evoluciona el concepto de acidez del suelo y los resultados contradictorios encontrados en numerosas investigaciones, sean la explicación de tanta controversia.

Por lo general, el pH en suelos tropicales muy ácidos no correlaciona bien con los requerimientos de cal (Martini, 56). El autor opina que ello se debe a que el calcio se encuentra por debajo de cierto nivel crítico, debajo del cual, el pH no sufre ningún descenso, ya que se estabiliza aunque el contenido de calcio continúe disminuyendo por meteorización y lixiviación. La lixiviación produce una mayor actividad del aluminio el cual actúa como amortiguador. Cuando el pH llega a los alrededores de 4.0, se estabiliza y aunque aumente el contenido de aluminio intercambiable

no sufre modificaciones. Sin embargo, la capacidad amortiguadora del pH del suelo aumenta y por ello es difícil obtener correlación entre el pH y las necesidades de cal.

Russell (72) opina que los suelos latosólicos ricos en aluminio intercambiable, necesitan cantidades muy altas de cal (más de 10 toneladas/hectárea), para alcanzar pH-s entre 6.0 y 7.0. Estos niveles muy altos de cal posiblemente llevarían a una concentración excesiva de calcio en el suelo y su complejo de cambio que a su vez produciría un fuerte desbalance nutricional expresado por relaciones inadecuadas de Ca/Mg, Ca/K, o elementos menores, lo cual podría estimular deficiencias de algunos de estos elementos.

Por lo general se ha encontrado que muchos cultivos, incluyendo pastos, responden considerablemente al encalado siempre que se abone con N, P, K, S y elementos menores (56). Truog (82) en suelos francos de Ohio, observó aumentos en los rendimientos del maíz, principalmente cuando el pH se llevaba de 5.8 a 7.4; ello estaba asociado con una liberación del fósforo nativo a fósforo aprovechable. Abruña et al (1) reportan como resultados de encalado en pastos abonados, un aumento en los rendimientos asociado con una mayor absorción de calcio, ningún efecto sobre el fósforo, menor absorción de manganeso y menor contenido de aluminio y manganeso intercambiable en el suelo. La respuesta a la cal se atribuyó a la reducción de los niveles tóxicos de aluminio y manganeso y nó a la

adición de calcio o a una menor fijación del fósforo.

Las investigaciones hasta ahora realizadas sobre los suelos de los Llanos Orientales de Colombia, parecen indicar que la práctica del encalamiento se hace necesaria en dichos suelos para la obtención de mejores cosechas, siempre y cuando vaya acompañada de una fertilización adecuada con elementos mayores y menores. No obstante, trabajos recientes no publicados, parecen mostrar que el efecto del encalado en los suelos de los Llanos Orientales de Colombia, se debe más al calcio como fuente nutricional que a la cal como mejoradora de algunas de las propiedades físico-químicas.

### 2.3. EL FOSFORO TOTAL EN EL SUELO.

El contenido de fósforo total en los suelos, varía de acuerdo a muchos factores (81); por ello, quizás sea más importante hablar sobre las formas como se encuentra este elemento en el suelo y su relación con la disponibilidad para las plantas. No obstante, el fósforo total puede ser una medida de reserva y potencial adecuado de P en el suelo para la nutrición de las plantas. Algunos autores, como Aldrich y Buchman (2), han encontrado una relación directa entre el P total y el disponible para las plantas.

### 2.4. EL FOSFORO ORGANICO.

Existen cinco tipos de compuestos fosforados en la fracción

orgánica de los suelos; son ellos: fosfolípidos, ácidos nucleicos, fosfatos metabólicos, fosfoproteínas y fosfatos de inositol. Se cree que los tres primeros se encuentran en cantidades pequeñas y de baja estabilidad en el suelo. La importancia de las fosfoproteínas no está muy bien definida. La fracción principal está constituida en general por derivados de la fitina (58).

Uno de los mayores problemas con que cuenta la química del fósforo del suelo, consiste en la falta de un método adecuado para valorar cuantitativamente el fósforo orgánico.

Existen dos formas de medir el fósforo orgánico en el suelo. Muchos autores han adelantado investigaciones para la obtención de métodos eficaces en su determinación. Sin embargo, hasta el momento, la determinación del fósforo orgánico del suelo, no cuenta con un método específico que se pueda catalogar como el mejor.

La primera técnica para la evaluación del fósforo orgánico se basa en una extracción alcalina después de haber removido previamente las bases del suelo con una solución ácida. La segunda tiene como principio, la destrucción de la materia orgánica, bien sea por ignición o con agua oxigenada.

Según Saunders y Williams (74), los métodos fallan porque envuelven reacciones de hidrólisis y oxidación de la materia orgánica. En la extracción con soluciones alcalinas estas reacciones

ocurren cuando se obtiene el extracto; y en la determinación por destrucción de la materia orgánica, suceden en el tratamiento que se le dá al suelo antes de la extracción del fósforo.

Uno de los métodos más usados actualmente en Colombia para la determinación del fósforo orgánico es el de ignición de Saunder y Williams (74), y con el han obtenido buenos resultados algunos autores como Tafur (79), Blasco y Bohorquez (12).

Durante el proceso se calienta la muestra suficientemente para destruir la materia orgánica y para que el fósforo se desprenda de las moléculas orgánicas de las cuales estaba formando parte. La mayoría de los autores usan temperaturas de 500 a 550 °C. (25, 74, 85). Sin embargo, Leg y Black (50), sugieren temperaturas del orden de los 250 °C., puesto que temperaturas de 500 a 600 °C causan error debido a cambios en la solubilidad de los fosfatos inorgánicos. Esta opinión no es compartida por todos los autores y la mayoría de ellos prefieren temperaturas elevadas, tanto para suelos tropicales (74), como de clima templado (74, 86).

2.4.1. El fósforo orgánico en el suelo y algunos factores que lo afectan. En algunos suelos vírgenes de los Estados Unidos (78), se han encontrado contenidos de fósforo orgánico más alto que en suelos cultivados y esto puede equipararse con los resultados encontrados por Benavides (10), en suelos de antillanura de los Llanos Orientales de Colombia poco cultivados, en donde el fósforo

orgánico, representa más del 60% del fósforo total. No obstante, por experimentos de incubación, se ha establecido que las formas presentes de fósforo orgánico en suelos cultivados, son más persistentes y menos mineralizables (80).

Friend y Birch (29) encontraron que el fósforo orgánico y el extraído con NaOH 0.1 N (que también contiene fósforo orgánico), correlacionaron bien con la respuesta de la planta a la aplicación de fertilizantes fosforados.

También se han obtenido correlaciones entre el tamaño de las partículas del suelo y su contenido de fósforo orgánico (36, 90). Así pues, Williams y Saunders (90), observaron que el 85% del fósforo orgánico estaba asociado a la fracción arcilla. La adsorción de algunos tipos de compuestos orgánicos fosforados sobre arcillas ha sido informada por varios autores (9, 38), y en general se cree que esta adsorción, disminuye la velocidad de mineralización del fósforo, contribuyendo así a su acumulación (80). Esto podría explicar en parte, el que algunos autores como Benavides (10), Blasco y Bohórquez (12), hayan encontrado predominancia del fósforo orgánico en suelos de textura fina de los Llanos Orientales de Colombia.

El tipo de mineral de arcilla, también juega un papel importante en el contenido de fósforo orgánico. Así por ejemplo, la alófana, forma complejos estables con la materia orgánica (17), lo que hace

difícil su mineralización.

2.4.2. El fósforo orgánico y la acidez del suelo. En general, se ha encontrado que en suelos alcalinos, la contribución del fósforo orgánico al fósforo total es baja, llegando rara vez a una tercera parte de este (16, 30, 75). No obstante, existen informes con resultados contradictorios (7); Tafur (79), en suelos del Valle del Sinú (Colombia), algunos de ellos con pH superior a 7.0, encuentra que el fósforo orgánico representa más del 50% del fósforo total.

San Gupta y Cornfield (75), encontraron una correlación directa entre el contenido de  $\text{CaCO}_3$  y la cantidad de fósforo orgánico en suelos calcáreos. Los autores sugieren que la abundancia del  $\text{CaCO}_3$  ocasiona una reducción de la mineralización del fósforo orgánico y que a ello se debe la buena correlación encontrada. Awan (6), Black y Goring (11), encontraron en algunos suelos ácidos, que la velocidad de mineralización del fósforo orgánico aumentaba con el encalamiento.

Goring (32), estableció que a valores de pH por encima de 7.5, disminuye la síntesis del fósforo orgánico.

Vandiest y Black (85), en estudios sobre suelos alcalinos, extrayendo el fósforo orgánico con una solución alcalina, hallaron una buena correlación entre éste y el fósforo absorbido por diferentes plantas. No obstante, ello no ocurrió en suelos ácidos. Dentro

del rango de pH-s ácidos, aún no se ha podido establecer la influencia de éstos sobre la cantidad de fósforo orgánico presente (Jackman, 41).

#### 2.5. EL FOSFORO INORGANICO.

Los fosfatos minerales del suelo se pueden clasificar en cuatro grupos a saber: fosfatos de calcio, fosfatos de aluminio, fosfatos de hierro y fosfatos de hierro reducidos y extraídos después de remover los tres anteriores (Chang y Jackson, 20).

La determinación de cada una de estas formas se puede hacer mediante procedimientos de fraccionamiento de fósforo, que se basan en la solubilidad selectiva de los compuestos de fósforo a diferentes extractantes; por ello, el método sigue un orden en el cual primero se extraen los fosfatos de calcio, luego los de aluminio, posteriormente los de hierro y luego las formas reducidas.

El método es una contribución muy importante a la ciencia del suelo, ya que permite fraccionar y caracterizar las diferentes formas inorgánicas del fósforo en el suelo, las cuales a su vez son de importancia en estudios de fertilidad puesto que la solubilidad de cada una de las formas de fósforo en el suelo es un factor que afecta la disponibilidad de este elemento para las plantas (53). También ha servido para adelantar estudios de distribución, fijación y disponibilidad de fósforo en el suelo, y ha tenido mucha

importancia en estudios de fertilidad y pedología (10).

2.5.1. Fósforo soluble en agua y fácilmente reemplazable. Por altos que sean los niveles de fósforo total en el suelo, es muy poco el fósforo soluble en agua. Se considera que generalmente la cantidad es pequeña en extremo, siendo menor de 1 p.p.m. (81).

Se ha reportado que el fósforo soluble en agua se encuentra en equilibrio con las formas iónicas de la superficie coloidal del suelo (48).

Chang y Jackson (20) sostienen que al agitar el suelo durante una hora con  $\text{Cl NH}_4$  1 N, se remueve el fósforo soluble en agua y el unido por enlaces débiles al calcio intercambiable (fósforo fácilmente reemplazable). Yuan et al (93), usando el método de fraccionamiento de fósforo de Chang y Jackson, encontraron en suelos ácidos arenosos previamente fertilizados, que menos del 10% del fósforo aplicado pasaba a formas fácilmente reemplazables.

Pratt y Garber (66), encontraron que el fósforo extraído con  $\text{NH}_4 \text{Cl}$ , fué el que mejor correlacionó con el fósforo disponible para las plantas y con el extraído por los métodos de Bray y Kurts.

2.5.2. Fósforo soluble en ácidos débiles. Según Chang y Jackson (20), existen varios ácidos débiles que se pueden emplear en la extracción de fósforo. Son ellos el ácido carbónico saturado (empleado generalmente cuando los suelos son calcáreos), ácido acético

y ácido cítrico.

Sen Gupta y Cornfield (75, 76), recomiendan para fraccionamientos de fósforo, el uso de ácido acético 0.5N el cual extrae el fósforo unido al calcio no apatítico.

Ghani (31), propone un sistema de fraccionamiento de P, en el cual la primera extracción se hace con ácido acético, para así remover los mono, di y trifosfatos del calcio. El mismo autor afirma que el fósforo así extraído, constituye una fracción fácilmente disponible para las plantas.

2.5.3. Fósforo unido al aluminio. El tratamiento al suelo con fluoruro de amonio, después de haber removido el fósforo fácilmente intercambiable, extrae del suelo fósforo retenido por cationes trivalentes tales como el aluminio (Chang y Jackson, 20).

Muchos autores concuerdan en afirmar que el P-Al es una de las formas minerales en que se encuentra predominantemente este elemento en suelos ácidos. No obstante, no existe un concepto general sobre la disponibilidad de este fósforo para las plantas. Bouna (15), en estudios de fertilidad en cítricos encontró que gran porción del fósforo en el suelo, estaba en forma de fosfatos de aluminio, los cuales representaban una fuente potencial de P para la planta. Por el contrario, otros autores opinan que el fósforo unido al aluminio en el suelo, se encuentra fuertemente retenido y

por ende, difícilmente disponible para las plantas (81).

Pratt y Garber (66), encontraron que el fósforo extraído con fluoruro de amonio en suelos ácidos arenosos, correlacionaba bien con el fósforo extraído por los métodos de Bray; también observaron que el fósforo extraído con  $\text{NH}_4\text{F}$  en suelos ácidos arcillosos, se hallaba principalmente en forma de variscita.

El encalamiento de los suelos ácidos, podría aumentar la disponibilidad del fósforo para las plantas, ya que se puede precipitar la gibsita y disolverse la variscita, hasta obtener un nuevo equilibrio que trae como consecuencia un aumento en la concentración de las formas iónicas de fósforo ( $\text{HPO}_4^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) en la solución del suelo (53).

Sillampaa (77), al encalar suelos ácidos, encuentra que esta práctica no afectaba la solubilidad y disponibilidad del P-A1 nativo del suelo; resultados muy semejantes fueron encontrados por Benavides (10), en suelos ácidos de los Llanos Orientales de Colombia. Sin embargo, en suelos fertilizados con fósforo, al aumentar el pH en 1.5 unidades, Sillampaa (77), observó una disminución del 57% del P-A1 en comparación con los suelos no encalados.

Hsu y Jackson (40), encontraron un efecto marcado del pH en la solubilidad de los compuestos de fósforo en el suelo, observando que

a valores de pH entre 6 y 7, la solubilidad de los fosfatos de aluminio era muy semejante a la de los fosfatos de calcio y hierro.

2.5.4. Fósforo unido al hierro. Chang y Jackson (20), estiman que se pueden extraer los fosfatos de hierro no reducido del suelo al tratar éste con NaOH 0.1N durante 17 horas y después de haber removido previamente el fósforo fácilmente reemplazable y el fósforo unido al aluminio.

Appelt y Schalscha (4) encontraron que el P-Fe aumentaba con la incubación en suelos derivados de cenizas volcánicas. Mack y Barber (55) también observaron que al incubar bajo condiciones anaeróbicas, aumentaba el P-Fe; no obstante, éste no era disponible para las plantas.

Hanley y Murphy (36), observaron en suelos ácidos que el enlace P-Fe predomina en las fracciones correspondientes a las arcillas y limos de suelos bien drenados.

Gupta y Singh (35) encontraron que en suelos tropicales el fósforo unido al hierro representaba más del 40% del P total y que los fosfatos de calcio y hierro disminuían progresivamente a medida que se desarrollaban las cosechas. Sin embargo, el fósforo tomado por la planta, solo correlacionó con el fósforo unido al hierro.

### 3. MATERIALES Y METODOS

Para el presente trabajo, se seleccionó un suelo ácido en la antillanura de los Llanos Orientales de Colombia (Carimagua). Algunas de las propiedades físico-químicas de éstos suelos, aparecen en el Cuadro 1. Una información más detallada sobre caracterización de perfiles es dada por Benavides (10).

En general, el suelo era ácido con alto contenido de aluminio intercambiable, mediana capacidad de intercambio catiónico, bajo contenido de bases intercambiables y muy bajo contenido de fósforo. Textura franco arcillosa con buena permeabilidad; algunos autores como León (52) han encontrado predominancia de minerales de arcilla de tipo 1:1 (caolin), con pequeñas cantidades de minerales interestratificados del tipo vermiculita-clorita.

El clima de la zona es húmedo tropical, con una precipitación pluvial promedio de 3.000 mm. por año (10). La mayor precipitación se obtiene entre los meses de Marzo y Diciembre. La temperatura es más o menos constante, durante todo el año, con un promedio de 27 °C.

De acuerdo con el sistema de clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, estos suelos se pueden clasificar como oxisoles (34).

CUADRO 1. Algunas características físico-químicas de los suelos de Carimagua.

Determinaciones	
pH H <sub>2</sub> O (1:1) .....	4.9
pH KCl 1N (1:1) .....	3.8
Capacidad de Intercambio Catiónico* .....	15.0
Calcio* .....	0.35
Magnesio* .....	0.25
Potasio* .....	0.10
Sodio* .....	0.10
Aluminio Intercambiable* .....	3.10
Porcentaje de M.O. ....	3.5
P - Bray II** .....	2.0
P - Olsen** .....	4.5
P - Truog** .....	5.0
P - Fácilmente reemplazable** .....	0.
P - Ca no apatítico** .....	1.5
P - Al** .....	15.0
P - Fe** .....	30
P - Ca apatítico** .....	3.0
P - Mineral** .....	49.5
P - Orgánico** .....	71.5
P - Total .....	121.0
Textura: Franco-Arcillosa.	

\* - Miliequivalentes por 100 gramos de suelo.

\*\* - Partes por millón de fósforo.

La ejecución del trabajo tuvo lugar en el Laboratorio e Invernadero del Programa de Suelos del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias "Palmira".

Se montaron 4 experimentos con 3 replicaciones cada uno y en todos los casos se usó un diseño en bloques completamente al azar.

Todos los suelos recibieron dosis constantes de nitrógeno, potasio, boro, ~~cobre~~, zinc y molibdeno así:

- N - 70 kilogramos/hectárea usando como fuente Nitrato de Amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ).
- K - 70 kilogramos/hectárea usando como fuente Cloruro de Potasio (KCl).
- B - 10 kilogramos/hectárea de Bórax
- Cu - 5 kilogramos/hectárea de Sulfato de Cobre
- Zn - 5 kilogramos/hectárea de Sulfato de Zinc
- Mo - 3 kilogramos/hectárea de molibdato de amonio

El magnesio se aplicó foliarmente para evitar las interferencias y cambios producidos por su efecto en la acidez y diferentes formas de fósforo. Se utilizó como fuente una solución de 0.35 gramos/litro de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

### 3.1. EXPERIMENTO No. 1.

b) El suelo se incubó durante 65 días en potses plásticos con 2

kilogramos de suelo y dosis de 0-3 y 6 toneladas/hectárea de  $\text{CaCO}_3$  Q.P. con una humedad equivalente a la capacidad de campo.

a) - El experimento se diseñó con el objeto de evaluar el efecto de la incubación y el encalamiento en la acidez y diferentes formas de fósforo nativo de dichos suelos. Para ello se hicieron determinaciones de pH, Al intercambiable y fósforo extraído por los métodos de Bray II, Olsen y Truog, lo mismo que fraccionamiento de fósforo a los 15, 20, 35, 50 y 65 días de iniciado el experimento.

### 3.2. EXPERIMENTO No. 2.

En este caso el experimento se estableció con el fin de evaluar las transformaciones que sufre el fósforo cuando se aplica al suelo tratado y no tratado con cal y la asociación que tiene la acidez del suelo con las aplicaciones de fósforo y/o de cal.

El suelo se incubó con dosis de 0-3 y 6 toneladas/hectárea de  $\text{CaCO}_3$  Q.P. y 15 días después de iniciada la incubación se aplicaron 350 p.p.m. de fósforo, usando como fuente fosfato monocálcico Q.P. Se hicieron fraccionamientos de fósforo a los 15, 20, 35, 50 y 65 días de iniciada la incubación, lo mismo que determinaciones de pH y aluminio intercambiable, para así, valorar las formas a las cuales pasa el fósforo aplicado y sus diferentes transformaciones con los cambios de pH y aluminio intercambiable del suelo.

Paralelamente se determinó fósforo por los métodos analíticos de Bray II, Olsen y Truog, con el fin de establecer el efecto del enclamiento en la cantidad de fósforo extraído por dichos métodos.

### 3.3. EXPERIMENTO No. 3.

Los objetivos principales de este experimento fueron dos: el primero, identificar las formas de fósforo en el suelo que sirven como fuente de este nutriente a la planta; el segundo fue el de evaluar la eficiencia de los métodos analíticos de Bray II, Olsen y Truog. Para ello, se hicieron los mismos análisis y se aplicaron los mismos tratamientos del experimento No. 2, pero simultáneamente a la aplicación de fósforo, se sembró una planta por pote de maíz (Zea maíz) híbrido I.C.A. H-207.

Se tomaron muestras cuando la planta tenía 20, 35 y 50 días de edad, o sea a los 35, 50 y 65 días de iniciada la incubación. Como en el experimento No. 2 se muestreaba a la misma época pero sin sembrar, las formas aprovechables se identificaron por diferencia, haciendo la suposición de que la menor cantidad de fósforo presente en el suelo del experimento No. 3 en comparación con el No. 2, se debía a la extracción de la planta.

Se tomaron muestras de tejido vegetal y suelo. En el tejido vegetal se consideró por aparte la raíz y el tallo. Las muestras de suelo se tomaron alrededor de las raíces.

Como era necesario destruir la planta para la toma de muestras y dado que estas se tomaron a tres edades diferentes, el ensayo se montó por triplicado (experimentos 3A, 3B, 3C). Así pues, cuando las plantas tenían 20 días de edad, se tomaron las primeras muestras en el 3A y se dejaron el 3B y el 3C para muestrear a los 35 y 50 días de edad respectivamente.

#### 3.4. EXPERIMENTO No. 4.

Este experimento se estableció con el objeto de determinar el efecto de la cal en el fósforo aplicado y para que sirviera de complemento al No. 2. Aquí se aplicó cal pero después de quince días de haberse aplicado fósforo.

Usando como fuente de fósforo fosfato monocálcico Q.P., el suelo se incubó con 350 p.p.m. de fósforo durante quince días, pasados los cuales, se aplicaron tratamientos de 0, 3 y 6 toneladas/hectárea de  $\text{CaCO}_3$  Q.P. Se hicieron las mismas determinaciones que en el experimento No. 2, a los 15, 20, 35, 50 y 65 días de iniciada la incubación con fósforo.

#### 3.5. PROCEDIMIENTOS Y ANALISIS DE LABORATORIO.

3.5.1. El pH. Se determinó potenciométricamente con electrodo de vidrio en relación Suelo-Agua por volumen 1:1 y suelo KCl 1N por volumen 1:1.

3.5.2. Aluminio intercambiable. Se valoró usando como solución extractora KCl 1N y titulando con hidróxido de sodio 0.1N (Jackson, 43).

3.5.3. Determinaciones de fósforo.

3.5.3.1. Método de Bray II. El fósforo fué extraído agitando durante 40 segundos con una solución de HCl 0.1N y  $\text{NH}_4\text{F}$  0.03N. La valoración cuantitativa se hizo por colorimetría, desarrollando el color azul por el método del cloruro estannoso (43).

3.5.3.2. Método de Olsen. La extracción del fósforo se hace con  $\text{NaHCO}_3$  0.5M a pH 8.5. Para la valoración cuantitativa, también se empleó el desarrollo del color azul, usando como reductor el cloruro estannoso (43, 62).

3.5.3.3. Método de Trueg. El método extrae el fósforo por agitación durante media hora con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.002N a pH 3.0. El pH se ajusta con  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . (Jackson, 43).

3.5.3.4. Fraccionamiento de fósforo. El fraccionamiento se hizo de acuerdo a la metodología de Chang y Jackson (20), con las modificaciones propuestas por Sen Gupta y Cornfield (75, 76).

El fósforo fué fraccionado así: fácilmente reemplazable, o sea el extraído con cloruro de amonio 1N; fósforo unido al calcio no apatítico que se extrajo con ácido acético 0.5N; fósforo unido al aluminio, extraído con fluoruro de amonio a pH 8.2; fósforo unido

al hierro, o sea la extracción con hidróxido de sodio 0.1N y fósforo apatítico que fué extraído con ácido sulfúrico 0.5N.

Destruyendo la materia orgánica mediante calentamiento a 450 °C., se determinó el fósforo total y su extracción se hizo con ácido sulfúrico 1N (Saunders y Williams, 74). El fósforo orgánico se obtuvo de la diferencia entre el fósforo total y la suma de las fracciones inorgánicas determinadas separadamente. El fósforo fué determinado colorimétricamente en alícuotas adecuadas usando para el desarrollo del color azul, el método del ácido ascórbico (Alexander, 3).

### 3.6. ANALISIS DE TEJIDO VEGETAL.

Las muestras de tejido vegetal se secaron a estufa a 80 °C. y luego se molieron finamente para determinar en ellas calcio y fósforo así: 0.2 gramos de muestra se llevan a digestión con una mezcla de ácido clorhídrico, perclórico y nítrico concentrados (44). En el producto resultante de la digestión, se determinó fósforo por el método del vanadato de amonio (54), y calcio por absorción atómica.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

##### 4.1. EXPERIMENTO No. 1.

4.1.1. Cantidades de fósforo encontradas. Las formas de fósforo nativo estudiadas presentaron el siguiente orden decreciente: P-orgánico, P-unido al hierro, P-unido al aluminio, P-unido al calcio apatítico. No se encontró fósforo fácilmente reemplazable, ni fósforo unido al calcio no apatítico (Cuadro 2).

La contribución del fósforo orgánico al fósforo total, puede considerarse alta y representa en promedio valores entre el 45 y 55 por ciento.

4.1.2. Efecto de la cal en el fósforo nativo. La incubación y las aplicaciones de cal no produjeron cambios en las diferentes formas de fósforo nativo. Tampoco se observaron cambios en el fósforo extraído por los métodos de Bray II, Olsen y Truog. Esto se podría explicar por el hecho de que dichos suelos son extremadamente pobres en fósforo y por ello, la poca cantidad presente en cada una de las diferentes fracciones se encuentra muy fuertemente retenida (Cuadro 2).

No se observó una mineralización significativa del fósforo con las aplicaciones de carbonato de calcio; ello puede estar asociado con la baja cantidad de fosfatos de calcio encontrados en estos suelos;

CUADRO 2. Efecto del carbonato de calcio (3 y 6 toneladas/hectárea), y la incubación en las diferentes formas de fósforo nativo.

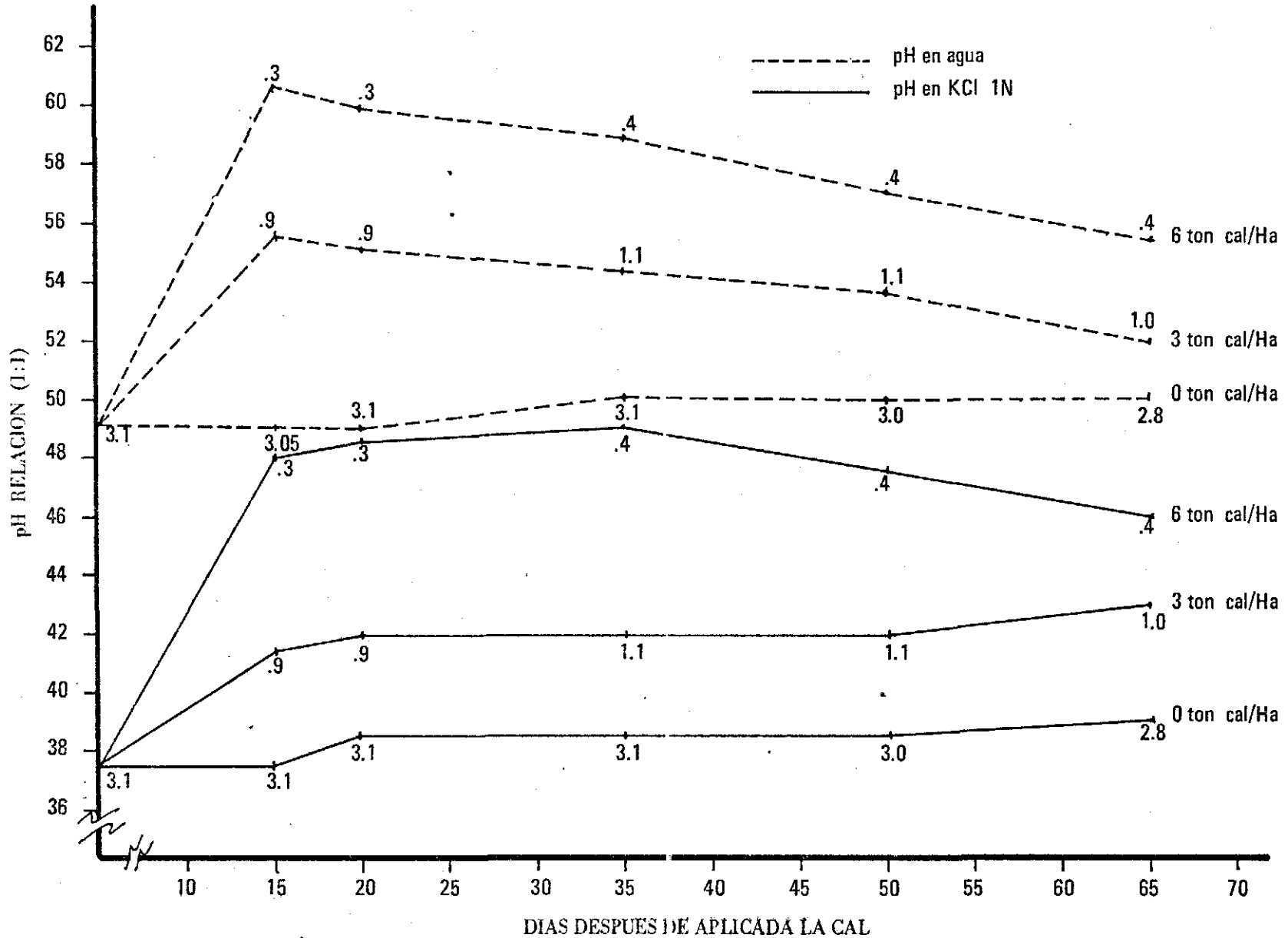
Formas de fósforo p.p.m.	D í a s d e I n c u b a c i ó n					
	0	15	20	35	50	65
P - Fácilmente reemplazable	0	0	0	0	0	0
P - Ca no apatítico	0	0	0	0	0	0
P - Al	13	13	13	13	13	13
P - Fe	38	38	37	38	38	40
P - Apatítico	3	3	3	3	3	3
P - Mineral	54	54	53	54	54	56
P - Total	121	121	121	121	121	121
P - Orgánico	67	67	68	67	67	65
% P - Orgánico	55.4	55.4	56.2	55.4	55.4	53.7
P - Bray II	3	3	3	2.8	5	5
P - Olsen	4.8	4.8	5	4.0	5	5
P - Truog	8	8	8	7.0	7.5	7.5

dado que, los microorganismos para su crecimiento celular, utilizan el fósforo bajo la forma de fosfatos de calcio (Katznelson, 46).

Teniendo en cuenta que no hubo mineralización del fósforo y que el suelo fué tratado con suficientes cantidades de elementos mayores (menos fósforo) y menores, podemos pensar de que el fósforo es un elemento limitante en la actividad microbiana de estos suelos.

4.1.3. La acidez del suelo y su relación con el encalamiento y aluminio intercambiable. En la figura 1 se puede observar que los suelos responden muy bien a las aplicaciones de cal, hasta tal punto que se neutraliza gran parte de la acidez intercambiable. Cuando el pH fué determinado en agua, hay un fuerte ascenso hasta los quince días, a partir de los cuales se inicia un descenso; mientras que si el pH se mide en KCl 1N, también se observa un fuerte ascenso hasta los quince días pero el pH sigue aumentando hasta los 35 días. Ello indica que entre los 15 y 35 días de aplicada la cal, ésta sigue neutralizando acidez que no es detectada potenciométricamente en solución suelo-agua y en donde posiblemente el aluminio y el hierro, juegan un papel importante. Obsérvese en la figura 1 que cuando el pH se determinó en agua en la curva de 6 toneladas de  $\text{CaCO}_3$ /hectárea, a los 65 días el pH está por 5.5 y el aluminio intercambiable en 0.4; mientras que en la curva de 3 toneladas/hectárea a los 15 días el pH estaba también en 5.5, pero el aluminio intercambiable se encontraba en 0.9. Nótese que esta

FIGURA 1. Efecto del encalamiento en la acidez del suelo.



NOTA. Los números en cada línea indican valores de Aluminio intercambiable.

concordancia de pH-s a diferentes contenidos de aluminio intercambiable, no se observa cuando los pH-s fueron tomados en KCl 1N. Ello corroborara lo dicho anteriormente de que el pH promedio en agua no está detectando gran parte de la acidez intercambiable de dichos suelos. No obstante se encontraron altos coeficientes de correlación entre el pH y el aluminio intercambiable tanto para pH-s medidos en agua, como para pH-s determinados en KCl 1N (Cuadro 3).

#### 4.2. EXPERIMENTO No. 2.

4.2.1. Relaciones del encalamiento y/o las aplicaciones de fósforo con la acidez del suelo. Al observar en la figura dos las gráficas correspondientes a los tratamientos de tres toneladas por hectárea de  $\text{CaCO}_3$  y tres toneladas de cal más 350 p.p.m. de fósforo, se puede ver que en el primer caso el descenso de pH se inicia a los quince días mientras que en el segundo caso este sigue aumentando hasta los veinte días (aproximadamente 0.4 unidades), para luego iniciar un descenso y tratar de estabilizarse a un valor de pH de 5.5 a los 65 días. Este efecto del fosfato en el aumento del pH se observa a través de todo el período de incubación, pues a los 65 días aún persiste esa diferencia de 0.4 unidades.

Al comparar el testigo con el suelo tratado con fósforo, también se ve un efecto marcado del fósforo en el aumento del pH (Figura 2). No obstante, a los 65 días en ambos casos se observa

CUADRO 3. Ecuaciones de regresión y coeficientes de correlación  
entre el aluminio intercambiable y el pH del suelo.

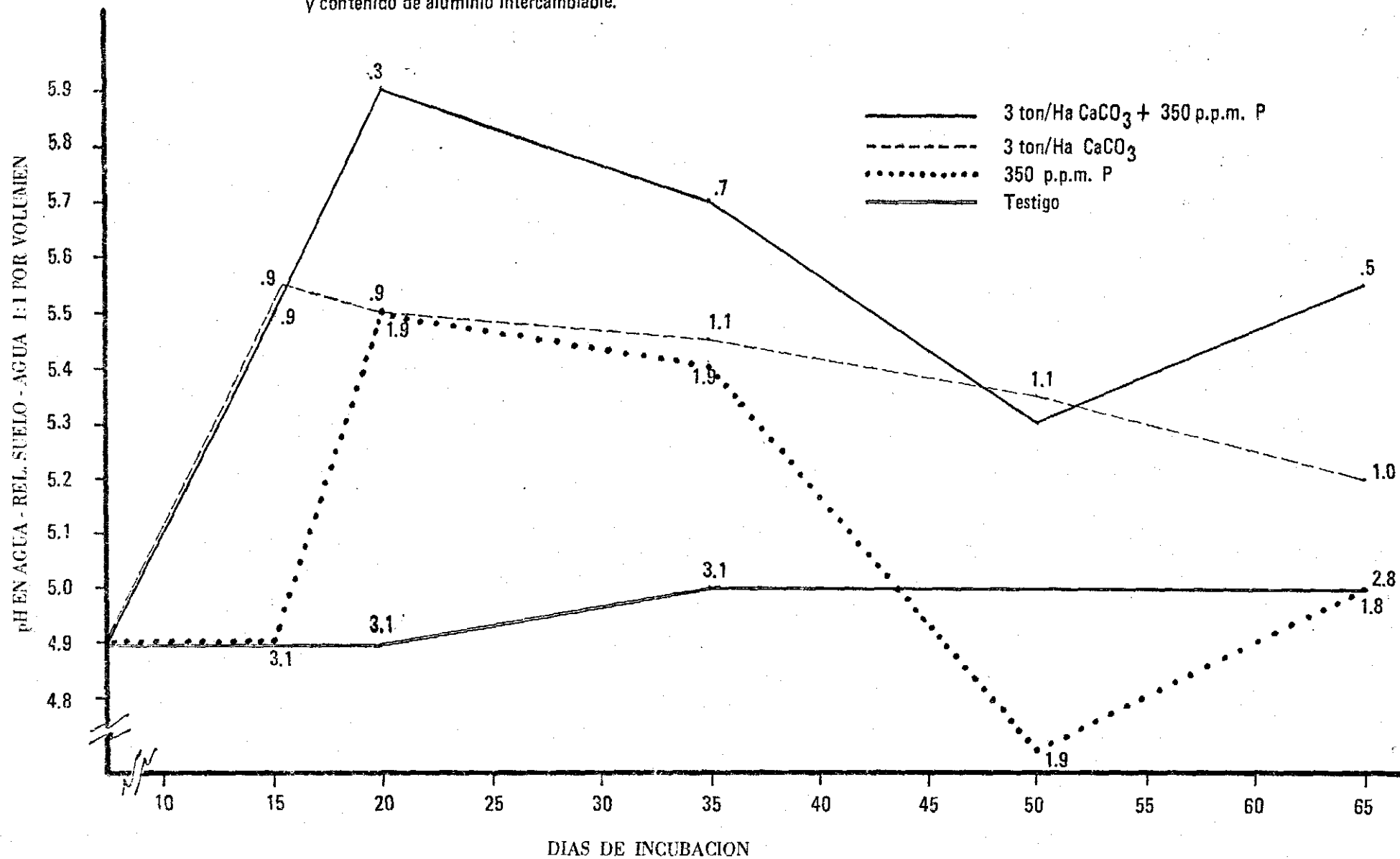
E c u a c i o n e s	Coeficientes de Correlación
$Y = 5.9054 - 0.331 x$	- 0.9
$Y = 5.42196 - 1.0045 \log x$	- 0.94
$Y = 6.12476 - 0.9439 x - 0.17438 x^2$	0.94
$\log Y = 0.73287 - 0.08041 \log x$	0.95
$\log Y = 0.77187 - 0.02671 x$	- 0.92
$Y' = 4.7234 - 0.3249 x$	- 0.91
$Y' = 4.2485 - 1.0126 \log x$	- 0.96
$Y' = 5.101 - 1.125 x + 0.2276 x^2$	0.96
$\log Y' = 0.6751 - 0.334 x$	- 0.92
$\log Y' = 0.626199 - 0.103208 \log x$	- 0.97

Y = pH en relación suelo-agua por volúmen 1:1

Y' = pH en relación suelo-KCl 1N por volúmen 1:1

X = Aluminio intercambiable en meg./100 gramos de suelo.

FIGURA 2. Efecto del encalamiento (3 ton/Ha de  $\text{CaCO}_3$ ) y las aplicaciones de P (350 p.p.m.) en el pH y contenido de aluminio intercambiable.



NOTA. Los números de cada línea indican el contenido de Al Intercambiable.

el mismo pH aunque con diferentes contenidos de aluminio intercambiable; sin embargo, como anteriormente se vió, cuando se aplicó fósforo al suelo previamente tratado con cal, a los 65 días aún persistía el efecto del fósforo en el aumento del pH. Entonces, podríamos pensar en una interacción calcio-fósforo que afecta algunas reacciones de acidez del suelo. Es muy posible que esta interacción tenga relación con la actividad microbiana del suelo, pues como se verá más adelante, tanto el calcio como el fósforo son elementos limitantes en dicha actividad.

La igualdad de pH-s a diferentes contenidos de aluminio, también se observa comparando el suelo tratado únicamente con fósforo y el suelo que recibió solamente cal (figura 2). En el primer caso, a los veinte días el pH estaba en 5.5 con un contenido de aluminio intercambiable de 1.9, mientras que con la aplicación de cal, el pH era el mismo, pero el aluminio intercambiable estaba en 0.9. Ello nos daría lugar a pensar que no todo el aluminio extraído con la solución de KCl 1N, es responsable de la acidez intercambiable.

Las aplicaciones de fósforo disminuyeron la correlación entre el aluminio intercambiable y el pH (cuadros 3 y 4); más aún, en el cuadro 4 se puede observar que los mismos coeficientes de correlación disminuyen cuando el pH fué medido en KCl 1N; luego las aplicaciones de fósforo pueden elevar el pH por la neutralización del aluminio intercambiable. Sin embargo, la neutralización del aluminio

Cuadro 4. Ecuaciones de regresión y coeficientes de correlación entre el pH y el aluminio intercambiable de los suelos tratados con fósforo.

E c u a c i ó n	Coefficiente de Correlación
$Y = 6.06305 - 0.4467 x$	- 0.85
$Y = 5.4532 - 0.8185 \log x$	- 0.90
$Y = 6.5474 - 2,49287 x + 0.9661 x^2$	0.95
$\log Y = 0.73588 - 0.062284 \log x$	- 0.92
$\log Y = 0.78292 - 0.03454 x$	- 0.85
$Y_1 = 4.8412 - 0.547717 x$	- 0.80
$Y_1 = 4.05392 - 1.162774 \log x$	- 0.85
$Y_1 = 5.044123 - 1.180844 x + 0.231707 x^2$	0.84
$\log Y_1 = 0.685731 - 0.05722 x$	- 0.80
$\log Y_1 = 0.604047 - 1.19389 \log x$	- 0.85

$Y = \text{pH en agua.}$

$Y_1 = \text{pH en KCl}$

$X = \text{Aluminio intercambiable en m.e.q./100 gramos de suelo.}$

por los fosfatos no persiste con el tiempo, pues tanto en los tratamientos con cal, como en los tratamientos sin cal, el P-Al era alto inicialmente pero con el tiempo disminuía (Cuadro 5) y paralelamente aumentaba el fósforo unido al hierro, de donde se destaca

CUADRO 5. Efecto del encalamiento en los fosfatos de hierro y aluminio.

Días de aplicación de la cal	pH*		P-Fe en p.p.m. Tons/Cal/Hect.			P-Al en p.p.m. Tons/Cal/Hect.			Días de aplicado el fósforo
	H <sub>2</sub> O	KCl	0	3	6	0	3	6	
	15	5.5	4.1	38	40	34	13	12.5	
20	5.9	4.55	134	130	122	145	118	115	5
35	5.7	4.6	168	180	180	124	85	80	20
50	5.3	4.0	244	230	200	96	79	70	35
65	5.5	4.5	244	236	200	88	78	70	50

\*Cuando se aplicaron 3 toneladas de cal por hectárea.

la importancia del hierro en la acidez y fijación de fósforo de dichos suelos. Aunque el P-Al disminuía con el tiempo, no había tendencia a aumentar el aluminio intercambiable. Entonces, estos fosfatos de aluminio una vez formados, pueden sufrir transformaciones que probablemente no tienden a dejar nuevamente en libertad el aluminio intercambiable. Henwall (38) en estudios semejantes encuentra que la fijación del fósforo por el aluminio no sólo se debía al aluminio intercambiable, sino que también se extendía al aluminio presente en el látice de las arcillas. El tipo de investigación hecho en el presente trabajo, no es suficiente para hacer

la misma afirmación. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad, dado que los cambios del P-Al no correlacionaron con los cambios en el aluminio intercambiable.

La igualdad de pH-s a diferentes contenidos de aluminio observado para pH-s medidos en agua y KCl (figuras 2 y 4), podría atribuirse en parte al hecho de que la fuerte aplicación de fósforo, haya dado al suelo cierta capacidad buffer. No obstante, los resultados indican que existen otros factores aparte del aluminio intercambiable, asociados con las aplicaciones de fósforo que afectan el pH del suelo y en donde la actividad microbiana inducida por la aplicación de fósforo y calcio juega un papel importante.

Esta semejanza de pH-s a diferentes contenidos de aluminio para suelos tratados con cal y fósforo no se observó cuando se aplicaron 6 toneladas de  $\text{CaCO}_3$ /hectárea (figura 3). Ello nos está indicando que 3 toneladas de cal por hectárea, no son suficientes para neutralizar la acidez intercambiable de dichos suelos.

#### 4.2.2. Efecto del encalado en las diferentes formas de fósforo.

En todos los casos, cuando se aplicó fósforo bien fuera en suelo encalado o nó, el fósforo fácilmente reemplazable persistía hasta 20 días después de la aplicación de fósforo (Cuadro 6); no obstante, la fijación era menor cuando no se había aplicado cal. Así pues a los cinco días de aplicado el fósforo en el tratamiento sin cal, se encontraron 19 p.p.m. de P-fácilmente reemplazable, mientras

FIGURA 3. Efecto del encalamiento (6 ton/Ha  $\text{CaCO}_3$ ) y las aplicaciones de P (350 p.p.m.) en el pH y contenido de Al intercambiable.

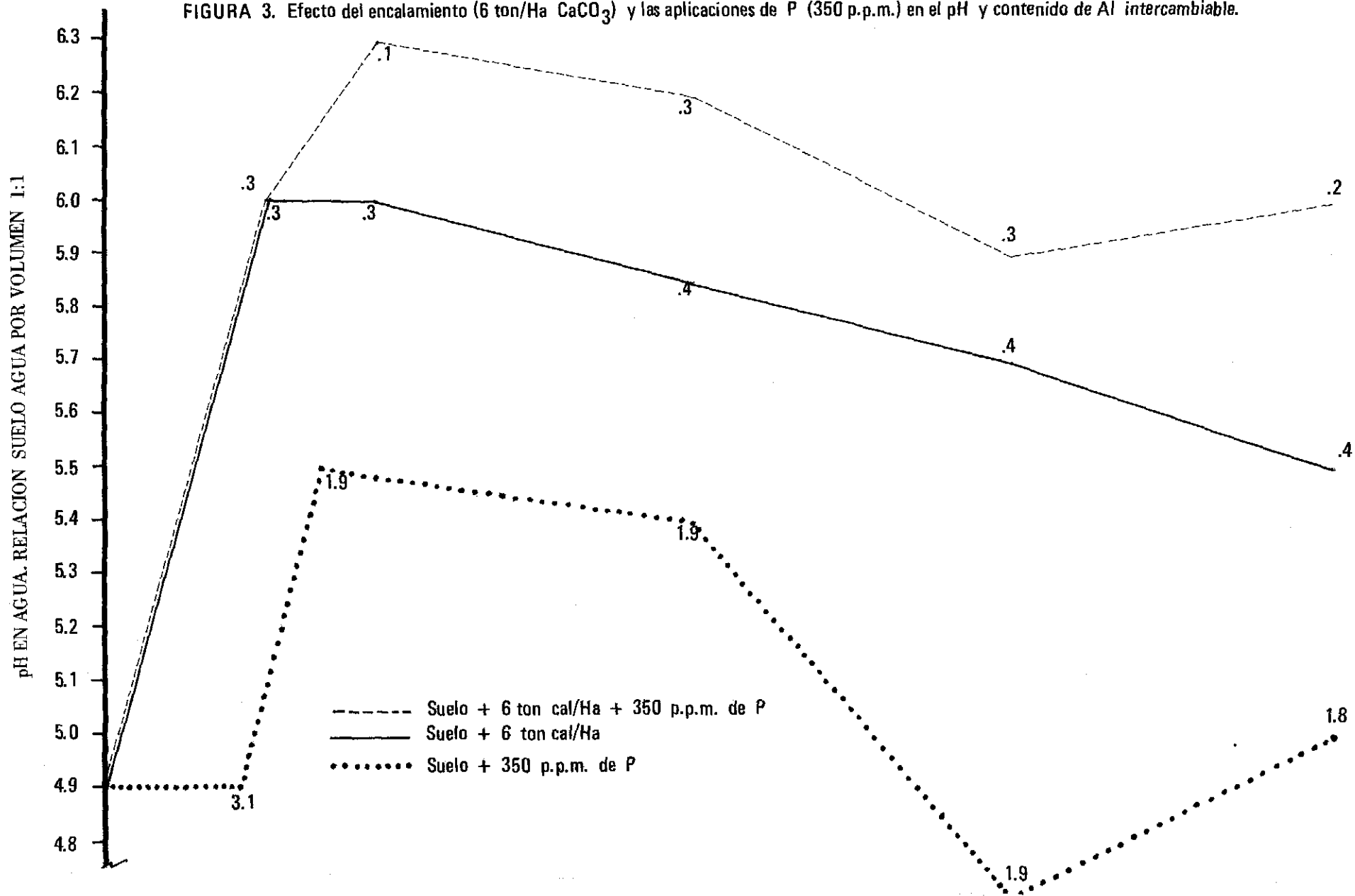
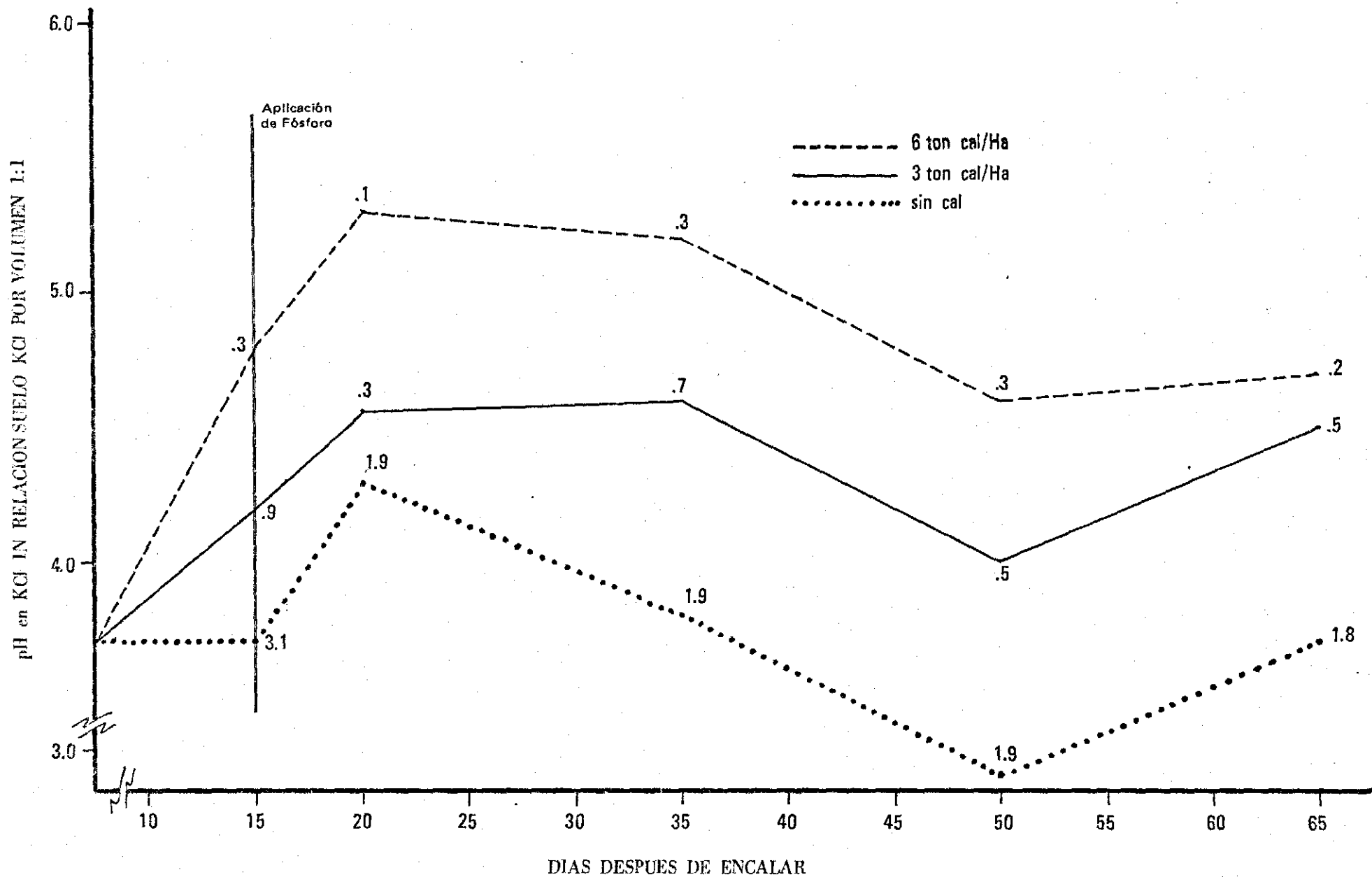


FIGURA 4. Efecto de las aplicaciones de P y cal en Al intercambiable y pH determinado con KCl 1N.



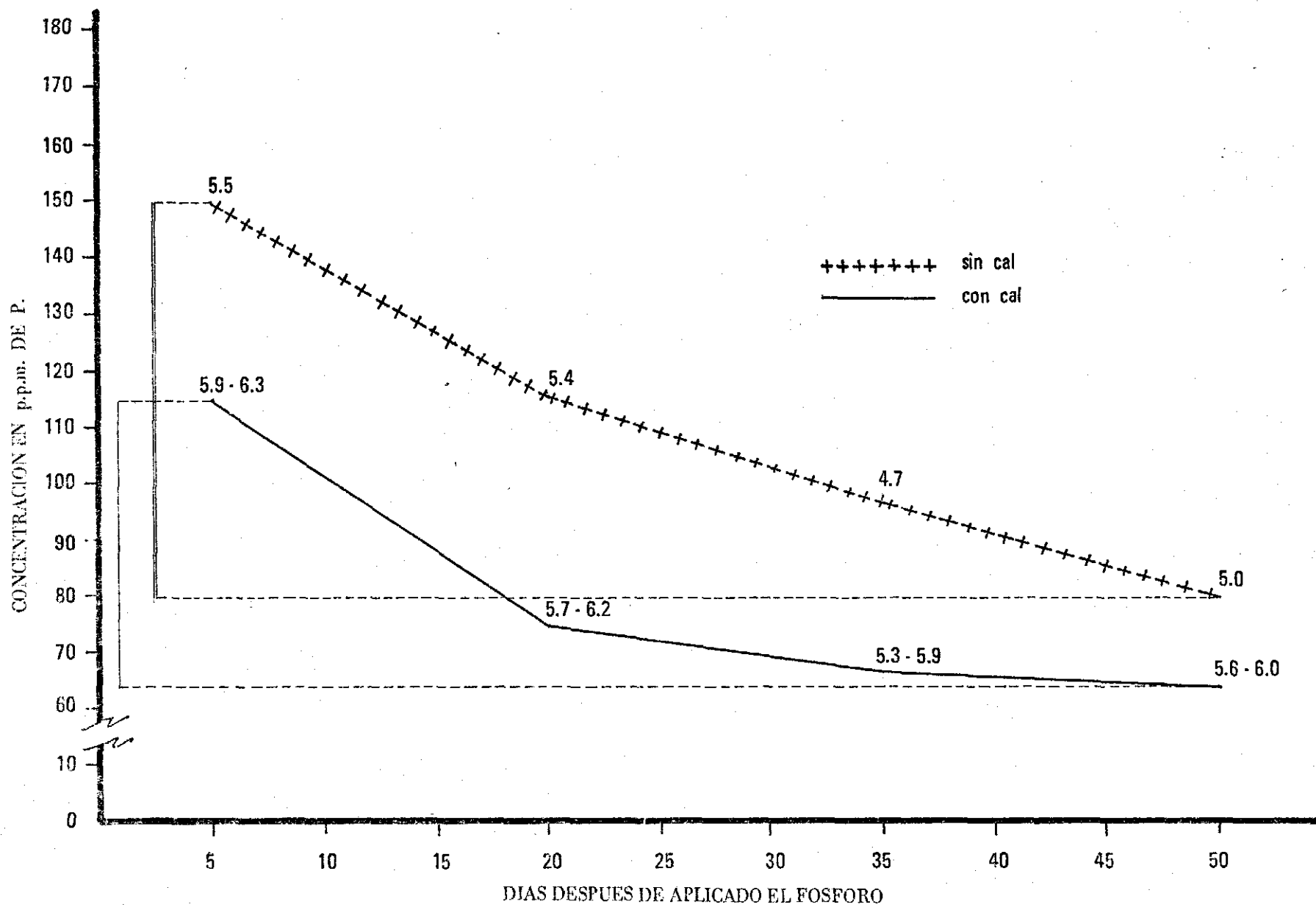
NOTA. Los números de cada línea indican el contenido de Al intercambiable.

CUADRO 6. Efecto del encalado en el fósforo extraído por diferentes métodos.

Concentraciones de P en p.p.m.						
	Días de Aplicado el Fósforo	P fácilmente reemplazable	P Calcio no Apatítico	P Bray II	P Olsen	P Truog
0	5	19.0	55	150	58	116
Tons.	20	1.3	37	116	72	55
Cal/	35	0	18	97	65	45
Hect.	50	0	8	80	59	39
3	5	7	46	122	50	105
Tons.	20	1	10	81	53	44
Cal/	35	0	12	72	47	40
Hect.	50	0	8	64	50	50
6	5	3.5	31	108	44	98
Tons.	20	T	10	70	40	44
Cal/	35	0	8	63	40	40
Hect.	50	0	8	64	45	50

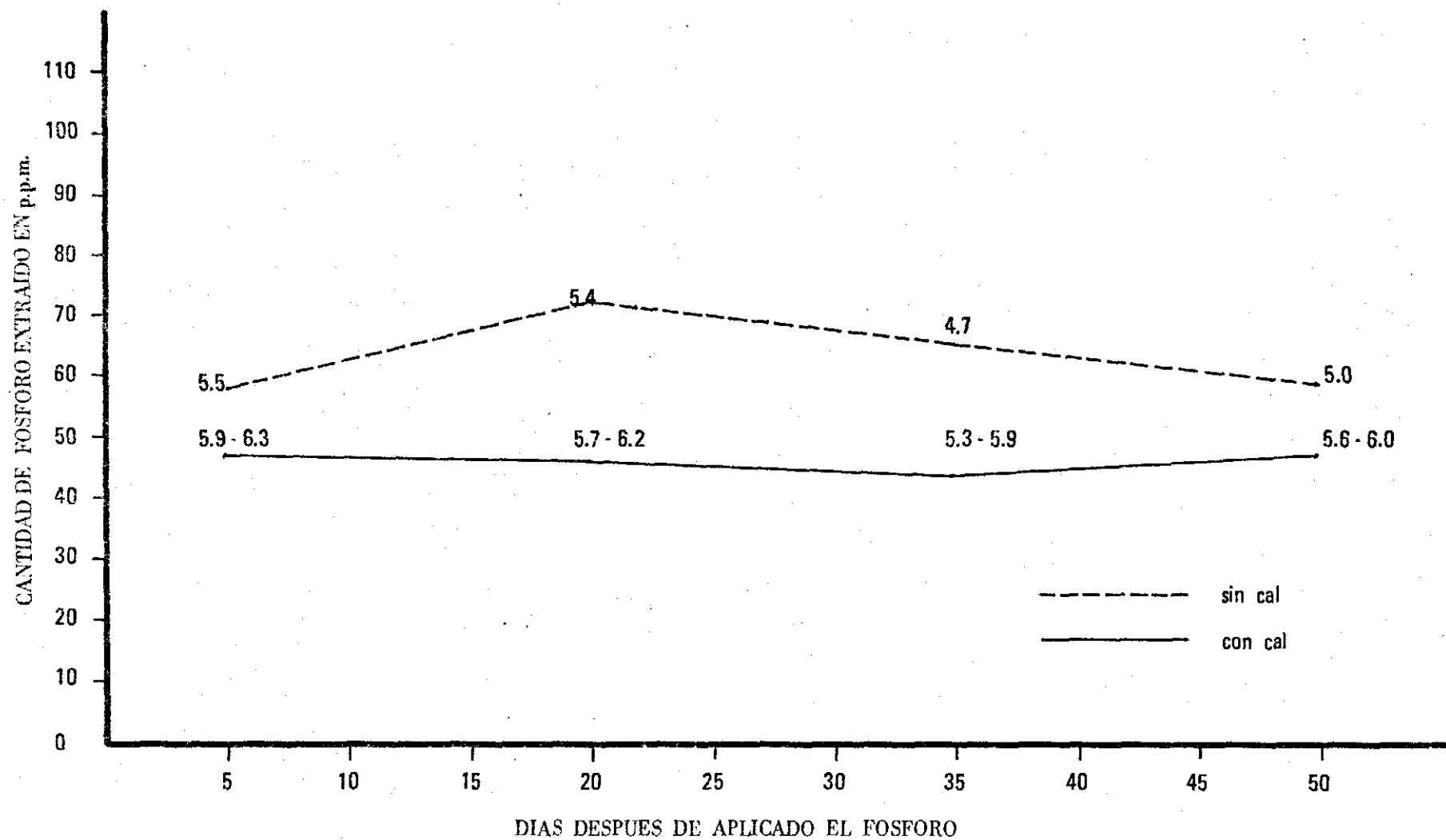
que en los tratamientos con cal, las cantidades fueron de 7.0 y 3.5 p.p.m. de P para tres y seis toneladas de cal/hectárea respectivamente. Resultados semejantes se encontraron con el fósforo unido al calcio no apatítico (Cuadro 6) y el fósforo extraído por los métodos de Bray II, Olsen y Truog (Cuadro 6 y Figuras 5, 6 y 7). Para el fósforo extraído por estos tres últimos métodos, no hubo diferencia significativa en los tratamientos con cal.

FIGURA 5. Efecto del encalado en el P extraído por el método de BRAY II.



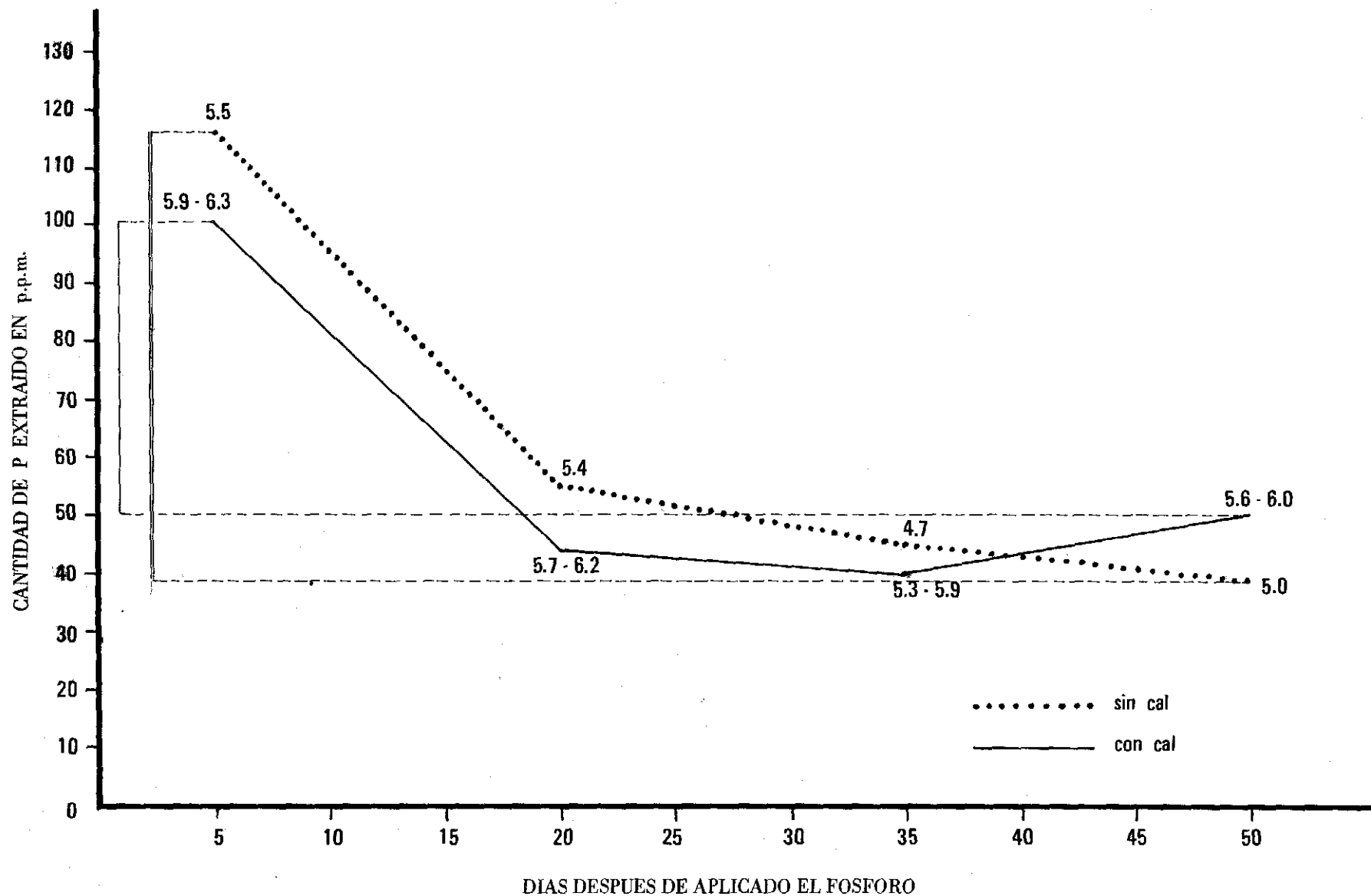
NOTA. Los números de cada línea indican valores de pH.

FIGURA 6. Efecto de la cal en el P extraído por el método de OLSEN.



NOTA. Los números de cada línea indican valores de pH.

FIGURA 7. Efecto del encalado en el fósforo extraído por el método de TRUOG.



NOTA. Los números de cada línea indican valores de pH.

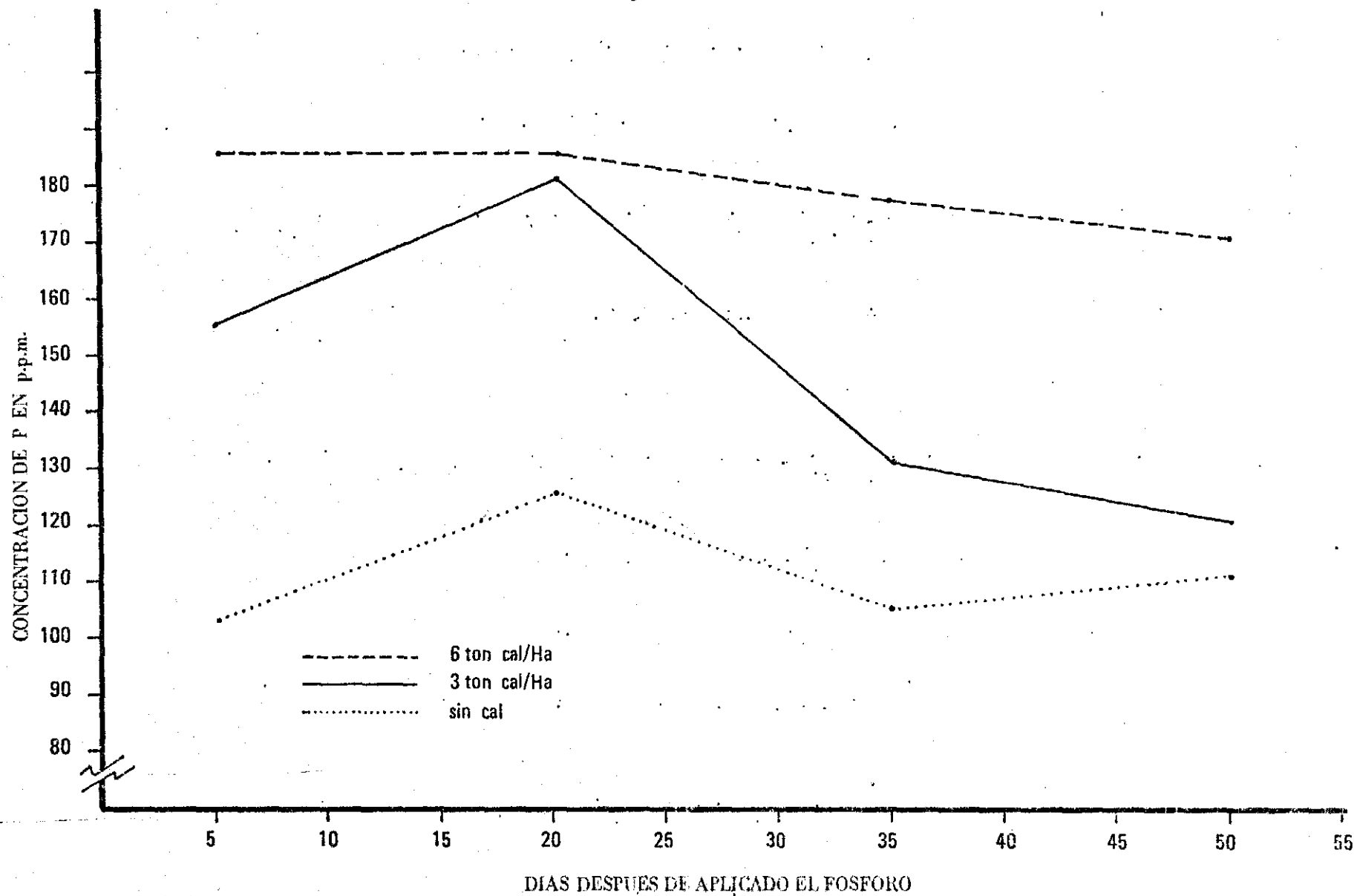
Los resultados aparentemente serían contradictorios pues en la mayoría de las investigaciones (40, 48, 53, 57), las aplicaciones de cal disminuyen la capacidad de fijación de fósforo del suelo; pese a ello, parece que el calcio y el fósforo al ser elementos limitantes de la actividad microbiana, una vez aplicados al suelo, incrementan grandemente esta actividad, lo cual trae como consecuencia una mayor fijación del fósforo inicialmente en parte por inmovilización. Obsérvese en la figura 8 y cuadro 7 que el fósforo orgánico aumenta a medida que aumenta la cantidad de cal aplicada; lo que nos demuestra el efecto del calcio en el incremento de la actividad microbiana y por ende en la inmovilización del fósforo.

CUADRO 7. Efecto del encalamiento en la formación y variaciones del fósforo orgánico.

Cal aplicada 15 días antes que el fósforo	Días después de aplicar 350 p.p.m. de P			
	5	20	35	50
0	103.5	124.8	105	110
3	155.5	180	130	120
6	185	185	177	170

No obstante, esta inmovilización no se tradujo en un problema para las plantas (posiblemente por la alta cantidad de fósforo

FIGURA 8. Efecto del encalamiento en el fósforo orgánico.



aplicado), pues como se verá más adelante en el experimento III, las formas minerales de P-Fe servían como fuente de fósforo y no se presentaron síntomas de deficiencia en las plantas. Por otra parte, aunque las cantidades de fósforo extraídas bajo las formas ya mencionadas eran mayores cuando no se había aplicado cal, en las figuras 5 y 7 también se puede observar algo de efecto benéfico de la cal en la fijación de fósforo. Nótese (figura 5), que cuando se aplicó cal, se fijaron aproximadamente 40 p.p.m. de P extraído por Bray II durante los cincuenta días de incubación; mientras que cuando no se aplicó cal, se fijaron en el transcurso de los 50 días de incubación 70 p.p.m. de fósforo. Algo semejante ocurrió con el fósforo extraído por el método de Truog (Figura 7), aunque en este caso ya se nota una liberación del fósforo fijado a los 50 días de incubación en el suelo tratado con cal.

El fósforo unido al calcio apatítico en todos los casos aumentaba con el tiempo de incubación, principalmente cuando el fósforo se aplicaba al suelo previamente tratado con cal. Sin embargo, el incremento no llega a ser considerable con el tiempo (Cuadro 8).

Dadas las condiciones de acidez de dichos suelos y la poca tendencia en ellos a la formación de fosfatos apatíticos, estas formas posiblemente no son de importancia en la química del fósforo de estos suelos ni en su disponibilidad para las plantas.

CUADRO 8. Efecto del encalamiento en la formación y cambios del fósforo apatítico.

Tons/Cal/Hect. aplicadas 15 días antes que el P	Cantidades de Fósforo Apatítico			
	Días de incubación con P (350 p.p.m.)			
	5	20	35	50
0	3.5	4.9	5.0	10
3	3.5	5.0	9.0	18
6	3.5	5.0	5.0	21

En el Cuadro 5 se observa que el fósforo unido al hierro aumenta con el tiempo de incubación, mientras que el fósforo unido al aluminio, aunque era alto inicialmente, con el tiempo tendía a disminuir. Si tenemos en cuenta que estas dos formas de fósforo mineral eran las únicas que persistían (y en alta cantidad) con el tiempo de incubación y que había inmovilización inicialmente por parte del fósforo orgánico, es de esperar que el aumento inicial de los fosfatos de hierro se haga a expensas de la disminución en los fosfatos de aluminio, pero cuando empieza la liberación del P orgánico (a los 20 días con 3 toneladas de cal y a los 35 con 6), el aumento en el P-Fe se hace a expensas del fósforo mineralizado y el liberado por el aluminio, hechos que destacan grandemente la actividad y capacidad del Fe para fijar fósforo en estos suelos.

El cuadro 7 y la figura 8 muestran las variaciones del fósforo orgánico cuando la aplicación de fósforo se efectuó 15 días después de haber aplicado cal; se observa que mientras mayor sea la cantidad de cal aplicada, hay mayor tendencia a la formación de fósforo orgánico. Inicialmente hay un aumento en la cantidad de fósforo orgánico, pero a los 20 días comienza la mineralización en los suelos sin cal y los tratados con tres toneladas de cal por hectárea, mientras que con 6 toneladas de cal/hectárea, la mineralización solo se inicia a los 35 días. Esto concuerda con los resultados obtenidos con el fósforo extraído por los métodos de Olsen, Bray II y Truog principalmente, en donde a partir de los 35 días, las diferencias entre el fósforo extraído en suelos sin tratar y tratados con cal, comienzan a disminuir. A partir de los 35 días se extrae más fósforo por el método de Truog en el suelo tratado con cal que en el no tratado (figura 7). Aunque lo mismo no ocurre con el fósforo extraído por Bray II y Olsen (figuras 5 y 6), si se observa un estrechamiento de las curvas a partir de los 35 días, lo que nos indica que la inmovilización del fósforo llega a ser máxima a los 35 días; alrededor de los cuales probablemente se inicia la mineralización.

#### 4.3 EXPERIMENTO No. 3.

Como anteriormente se dijo, el suelo usado para este experimento

recibió los mismos tratamientos del que se usó en el experimento 2, con la única diferencia que en el 3 se sembró maíz paralelamente a la aplicación de fósforo. Por tanto, las diferencias en los resultados entre estos dos experimentos solo se deben al efecto de la siembra.

4.3.1. Efecto de la siembra en la acidez del suelo. En los cuadros 9, 10 y 11 se presentan los valores de pH y aluminio intercambiable encontrados bajo incubación con siembra y sin ella. No se encontraron diferencias significativas ni en pH ni en aluminio intercambiable bajo diferentes tratamientos con cal entre el suelo sembrado y el suelo no sembrado.

CUADRO 9. Efecto de la siembra en el pH medido en agua. Relación Suelo-Agua (1:1) por volúmen.

Toneladas Cal/ Hectárea		D í a s   d e   I n c u b a c i ó n		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0	Sembrado	5.30	4.80	4.70
	No sembrado	5.40	4.70	5.00
3	Sembrado	5.70	5.30	5.40
	No sembrado	5.70	5.30	5.55
6	Sembrado	6.10	6.00	6.00
	No sembrado	6.20	5.90	6.00

\*Edad de la planta.

CUADRO 10. Efecto de la siembra en el pH medido en KCl 1N Relación Suelo-KCl 1N (1:1) por volúmen.

Toneladas de Cal/ Hectárea		D í a s de I n c u b a c i ó n		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0	Sembrado	3.5	3.2	3.2
	No sembrado	3.8	3.2	3.5
3	Sembrado	4.3	4.0	4.6
	No sembrado	4.6	4.0	4.5
6	Sembrado	4.9	4.5	4.7
	No sembrado	5.2	4.6	4.7

CUADRO 11. Efecto de la siembra en el aluminio intercambiable del suelo.

Toneladas de Cal/ Hectárea		D í a s de I n c u b a c i ó n		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
		Al <sup>+++</sup> en meq./100 gramos de suelo.		
0	Sembrado	2.0	2.0	1.9
	No sembrado	1.9	1.9	1.8
3	Sembrado	0.6	0.7	0.5
	No sembrado	0.7	0.5	0.4
6	Sembrado	0.3	0.2	0.4
	No sembrado	0.3	0.3	0.2

\*Edad de la planta.

## 4.3.2. Efecto de la siembra en las diferentes formas de fósforo.

4.3.2.1. En el fósforo orgánico. En el cuadro 12 se presentan los valores de fósforo orgánico encontrados entre los 35, 50 y 65 días de incubación que corresponden a épocas en las cuales la planta tenía 20, 35 y 50 días de edad. Se observa un ligero aumento en el fósforo orgánico del suelo sembrado, probablemente ello se deba al fósforo proveniente de las raíces de la planta.

CUADRO 12. Efecto de la siembra en el fósforo orgánico.

		Fósforo en p.p.m.		
		Días de Incubación		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0				
Tons.	Sembrado	125	115	130
Cal/ Hect.	No sembrado	124.8	105	110
3				
Tons.	Sembrado	185	150	140
Cal/ Hect.	No sembrado	180	130	120
6				
Tons.	Sembrado	190	195	195
Cal/ Hect.	No sembrado	185	177	170

\*Edad de la planta.

4.3.2.2. En el fósforo mineral. Todas las formas minerales de fósforo estudiadas, excepto los fosfatos de hierro, aumentaban en el suelo sembrado (Cuadros 13, 14, 15, 16, 17 y 18). Por otra parte, la suma de los incrementos en cada una de las fracciones correlacionó con el fósforo extraído por los métodos de Bray II y Truog.

Entonces, se podría deducir que, pese a la gran capacidad del hierro para fijar fósforo, la planta utiliza con cierta facilidad los fosfatos de hierro, pasándolos a formas más solubles que son detectadas por los métodos de Bray II y Truog.

CUADRO 13. Efecto de la siembra en el fósforo fácilmente reemplazable.

		Fósforo en p.p.m.		
		D í a s   d e   I n c u b a c i ó n		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0				
Tons.	Sembrado	8.0	6.0	8.5
Cal/ Hect.	No sembrado	1.3	0	0
3				
Tons.	Sembrado	13.0	2.6	6.8
Cal/ Hect.	No sembrado	0	0	0
6				
Tons.	Sembrado	13.0	2.0	6.8
Cal/ Hect.	No sembrado	0	0	0

\*Edad de la planta.

CUADRO 14. Efecto de la siembra en el fósforo unido al calcio no apatítico.

		Fósforo en p.p.m.		
		D í a s d e I n c u b a c i ó n		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0 Tons.	Sembrado	40	51	35
Cal/				
Hect.	No sembrado	37	10	8
3 Tons.	Sembrado	56	40	37
Cal/				
Hect.	No sembrado	10	12	8
6 Tons.	Sembrado	56	44	43
Cal/				
Hect.	No sembrado	10	8	8

CUADRO 15. Efecto de la siembra en el fósforo unido al aluminio.

		Fósforo en p.p.m.		
		D í a s d e I n c u b a c i ó n		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0 Tons.	Sembrado	126	110	100
Cal/				
Hect.	No sembrado	124	96	88
3 Tons.	Sembrado	90	85	85
Cal/				
Hect.	No sembrado	85	79	78
6 Tons.	Sembrado	90	80	85
Cal/				
Hect.	No sembrado	80	70	70

\*Edad de la planta.

CUADRO 16. Efecto de la siembra en los fosfatos unidos al hierro.

		Fósforo en p.p.m.		
		Días de Incubación		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0 Tons. Cal/ Hect.	Sembrado	151	162	166.5
	No sembrado	168	244	244
3 Tons. Cal/ Hect.	Sembrado	100	155.9	151.2
	No sembrado	180	230	236
6 Tons. Cal/ Hect.	Sembrado	94.2	113	90.2
	No sembrado	180	200	200

CUADRO 17. Efecto de la siembra en el fósforo aplicado.

		Fósforo en p.p.m.		
		Días de Incubación		
		35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0 Tons. Cal/ Hect.	Sembrado	5.0	6.0	10.0
	No sembrado	4.5	5.0	10.0
3 Tons. Cal/ Hect.	Sembrado	6.0	6.5	20.0
	No sembrado	5.0	9.0	18.0
6 Tons. Cal/ Hect.	Sembrado	6.8	6.0	15.0
	No sembrado	5.8	5.0	12.0

\*Edad de la planta.

Haciendo la consideración de que el fósforo fácilmente reemplazable y el unido al calcio no apatítico representan formas bastante solubles; la suma de dichas formas se correlacionó con el fósforo extraído por los métodos de Bray II, Olsen y Truog, encontrándose solamente buena correlación ( $r = 0.87$ ) con el fósforo extraído por el método de Truog, lo cual nos comprueba el buen funcionamiento de este método en dichos suelos. Nótese además (Cuadro 18), que el único fósforo que aumenta a medida que aumenta la dosis de cal, es el extraído por el método de Truog.

CUADRO 18. Efecto de la siembra en el fósforo total, mineral y el extraído por varios métodos analíticos.

Fósforo en p.p.m.	D í a s   d e   I n c u b a c i ó n								
	35 (20)*			50 (35)*			65 (50)*		
	Tons. Cal/Hect.			Tons. Cal/Hect.			Tons. Cal/Hect.		
	0	3	6	0	3	6	0	3	6
P total	455	450	450	450	440	440	450	440	435
P Mineral	330	265	260	335	290	245	320	300	240
P Bray II	126	155	155	147	142	122	138	130	122
P Truog	82	100	115	70	77	85	54	65	65
P Olsen	62	70	69	92	88	76	85	80	71

\*Edad de la planta.

4.3.3. Efecto del encalado en los rendimientos y/o absorción de Ca y P por la planta. En el cuadro 19 se presentan los rendimientos y cantidades de Ca y P extraídas por la planta a diferentes edades y con distintos tratamientos de cal. Se puede observar un efecto marcado de la cal en el aumento de los rendimientos; no obstante, no se encontraron diferencias significativas en los rendimientos para los tratamientos de 3 y 6 toneladas por hectárea de cal.

CUADRO 19. Efecto de la aplicación de Cal y/o fósforo en los rendimientos y absorción de calcio y fósforo por la planta.

		Tons. Cal/ Hect.	P Parte aérea p.p.m.	% P Parte Aérea	% P Raíz	% Ca Parte Aérea	Ca Par te aérea p.p.m.	Rénds. grs. mat seca (parte aérea)
Edad de la Planta	20 (Días)	0	6.230	0.37	0.6	0.500	8.420	3.37
		3	11.074	0.49	0.3	0.600	13.56	4.52
		6	11.196	0.49	0.3	0.920	21.02	4.57
35	0	7.056	0.36	0.4	0.450	8.82	3.92	
	3	12.000	0.40	0.15	0.500	15.00	6.00	
	6	12.100	0.40	0.15	0.800	24.4	6.10	
50	0	7.612	0.35	0.5	0.413	8.98	4.35	
	3	14.017	0.35	0.25	0.394	15.78	8.01	
	6	14.892	0.37	0.30	0.630	25.36	8.05	

El aumento en los rendimientos estaba asociado con una mayor concentración de Ca y P en la parte aérea de la planta. Para el fósforo esta asociación es más marcada ya que tampoco hubo diferencias significativas en la cantidad de fósforo absorbido por la planta para los tratamientos de tres y seis toneladas de cal por hectárea. No ocurrió lo mismo con el calcio en donde la cantidad de este elemento en la planta, era mayor a medida que aumentaba la dosis de cal. Todo esto nos da lugar a pensar que tanto el fósforo como el calcio, eran elementos limitantes en la producción, pero probablemente a partir de 3 toneladas de cal por hectárea, el calcio dejó de ser limitante y se presentó un consumo de lujo. No obstante, esta última afirmación no se puede hacer con toda certeza, pues faltarían datos como calidad del forraje, rendimiento y calidad del grano, etc.

Aunque no se establecieron los pesos de las raíces para poder determinar la cantidad de fósforo presente en ellas, si se puede observar (Cuadro 19), que el porcentaje de P en la raíz era más alto cuando la planta había crecido en suelo no tratado con cal. Resultados semejantes han sido encontrados por autores como Randall y Vose (67) y Clarkon (22), quienes atribuyen la concentración de fósforo en la raíz a un efecto tóxico del aluminio.

#### 4.4. EXPERIMENTO No. 4.

4.4.1. Efecto del encalado en la acidez del suelo previamente tratado con fósforo. En los cuadros 20, 21 y 22, lo mismo que en las figuras 8 y 9, se presentan los cambios de pH y aluminio intercambiable con diferentes tratamientos de cal, aplicada 15 días después de haber tratado el suelo con 350 p.p.m. de fósforo.

CUADRO 20. Efecto del encalado en el aluminio intercambiable del suelo previamente tratado con fósforo.

Tons. de Cal /Hect.	Aluminio Intercambiable en meq./100 gramos de suelo				
	Días de Aplicado el Fósforo				
	15	20 (5)*	35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0	2.0	1.8	1.7	1.6	1.4
3	-	0.4	0.4	0.6	0.5
6	-	0.3	0.3	0.3	0.1

\*Días transcurridos después de la aplicación de cal.

CUADRO 21. Efecto del encalado en el pH (Suelo-Agua 1:1 por Vol.) del suelo previamente tratado con fósforo.

Tons. de Cal /Hect.	pH del Suelo - Agua (1:1) por volúmen				
	Días después de aplicado el fósforo.				
	15	20 (5)*	35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0	5.3	5.2	5.2	5.0	5.2
3	x	5.9	5.6	5.4	5.2
6	x	6.3	6.3	5.6	5.8

CUADRO 22. Efecto del encalado en el pH (Suelo-KCl 1:1 por Vol), del suelo previamente tratado con fósforo.

Tons. de Cal /Hect.	pH del Suelo - KCl 1N 1:1				
	Días después de haber aplicado fósforo				
	15	20 (5)*	35 (20)*	50 (35)*	65 (50)*
0	3.9	4.0	4.0	3.6	4.0
3	-	4.7	4.5	4.0	4.2
6	-	5.3	5.2	4.6	4.8

\*Días después de aplicada la cal.

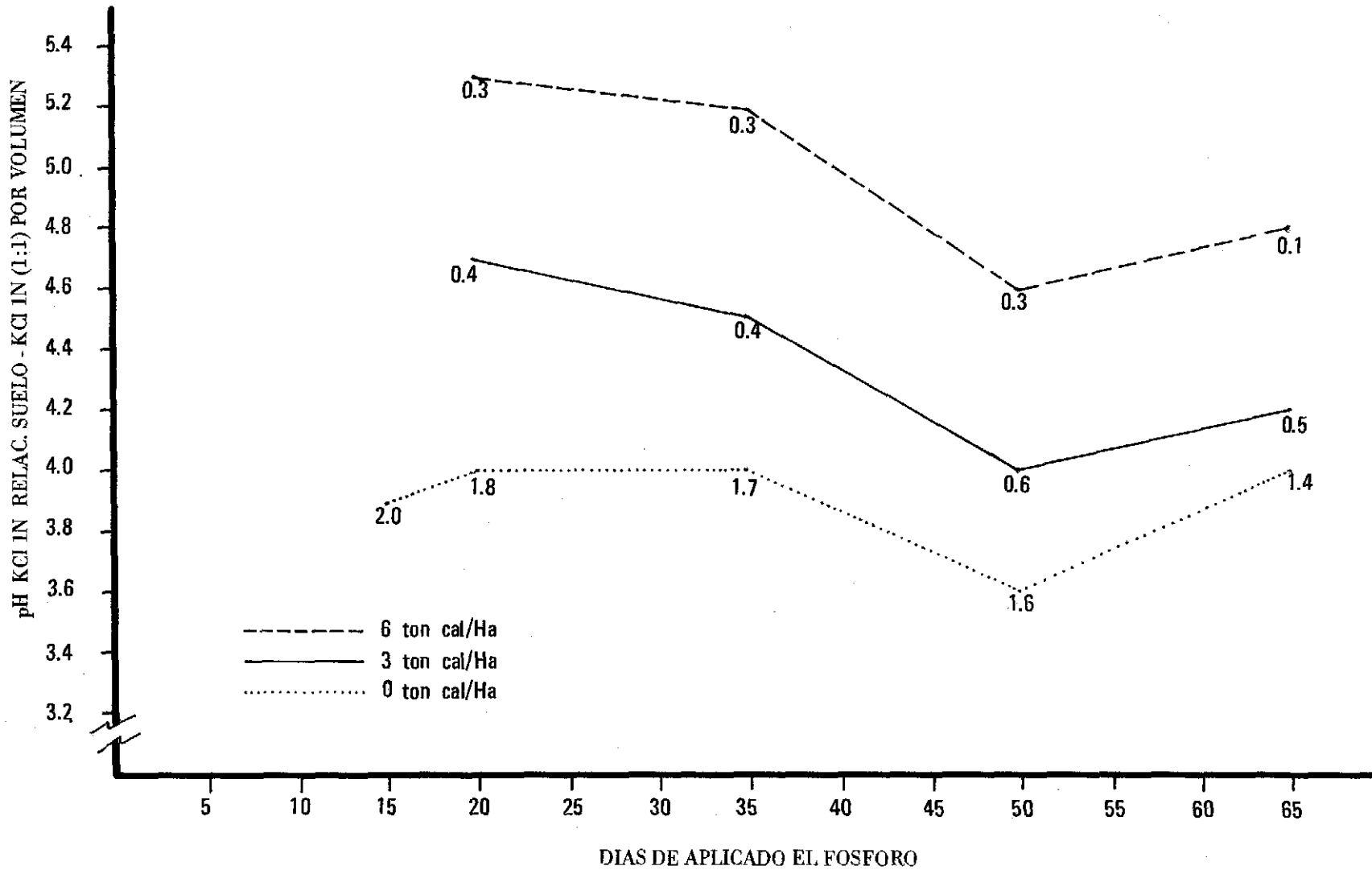
Al igual que en el experimento 2 se observa un aumento del pH y disminución en el contenido de aluminio intercambiable como consecuencia de la aplicación de fósforo.

También se puede observar que a iguales valores de pH corresponden diferentes niveles de aluminio intercambiable (figuras 9 y 10).

Muy semejante a lo encontrado en el experimento 2, las diferentes formas de fósforo mineral tienden a ser mayores cuando se aplicaron 3 toneladas de cal/hectárea, que cuando el suelo se trató con 6 toneladas de cal/hectárea (Cuadros 23 y 24). Fenómeno ya discutido anteriormente por el efecto del calcio en la actividad microbiana y por ende en la inmovilización del fósforo.

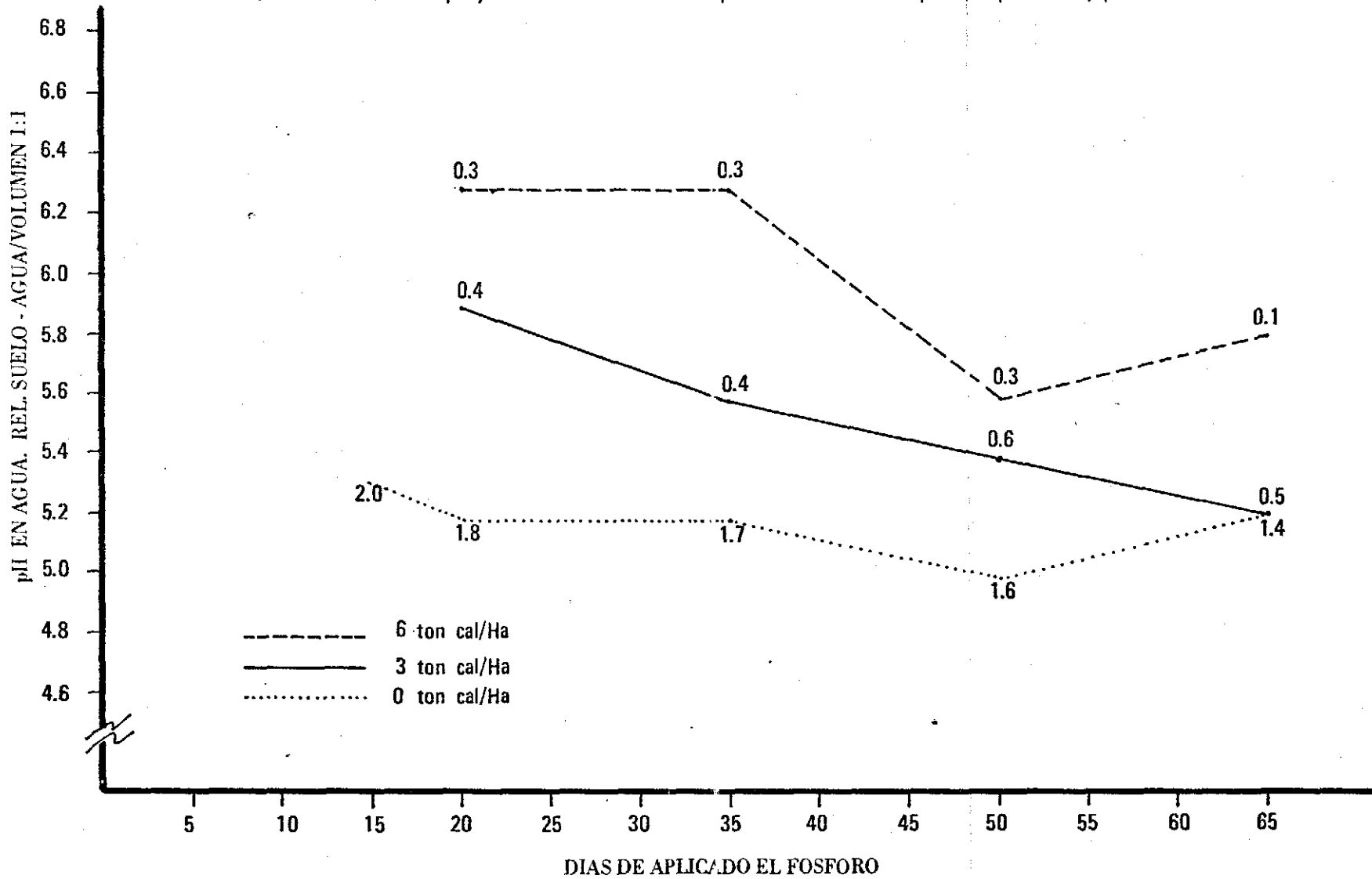
4.4.2. Efecto de la época de aplicación de cal en las diferentes

FIGURA 10. Variaciones del pH y Aluminio intercambiable aplicando cal 15 días después de aplicar 350 p.p.m. de Fósforo.



NOTA. Los números en cada punto de las líneas indican valores de Aluminio intercambiable.

FIGURA 9. Variaciones del pH y Aluminio intercambiable aplicando cal 15 días después de aplicar 350 p.p.m. de Fósforo.



NOTA. Los números en cada punto de las líneas indican valores de aluminio intercambiable.

**CUADRO 23.** Influencia de la época de aplicación de cal. (3 ton/Ha.) sobre algunas fracciones de fósforo en el suelo.

Epoca de aplicación de la cal	DÍAS DESPUES DE APLICADO EL FOSFORO														
	20	35	50	20	35	50	20	35	50	20	35	50	20	35	50
	P. Fácilmente reemplazable			P. Ca No apatítico			P. Aluminio			P. Hierro			Fósforo Apatítico		
15 días antes de aplicar el fósforo	0	0	0	10	12	8	85	79	78	180	230	236	5	9	18
15 días después de aplicar el fósforo	1	1	1	47	47	41	137	82	80	170	220	230	5	6	6
	P- Bray II			P- Olsen			P- Truog.			P- Mineral			P- Orgánico		
15 días antes de aplicar el fósforo	81	72	64	53	47	50	44	40	50	280	330	340	180	130	120
15 días después de aplicar el fósforo	140	145	138	63	81	81	82	70	62	360	356	358	100	104	102

NOTA. Las cantidades de fósforo están en p.p.m.

CUADRO 24. Influencia de la época de aplicación de cal ( 6 ton/Ha.) sobre algunas fracciones de fósforo en el suelo.

Epoca de aplicación de la cal	DIAS DESPUES DE APLICADO EL FOSFORO														
	20	35	50	20	35	50	20	35	50	20	35	50	20	35	50
	P. Fácilmente reemplazable			P. Ca No apatítico			P. Aluminio			P. Hierro			Fósforo Apatítico		
15 días antes de aplicado el fósforo	0	0	0	10	8	8	80	70	70	180	200	200	5	5	12
15 días después de aplicado el fósforo	1	0	0	47	45	38	116	70	75	175	190	190	6	6	6
	P. Bray II			P. Olsen			P. Truog			P. Mineral			P. Orgánico		
15 días antes de aplicado el fósforo	70	63	64	40	40	45	44	40	50	275	283	290	185	177	170
15 días después de aplicado el fósforo	115	106	100	52	57	57	82	76	51	345	311	309	115	149	151

NOTA. Las cantidades de fósforo están en p.p.m.

formas de fósforo. Cuando se incubé con fósforo y luego se aplicó cal, las formas minerales de fósforo presentes en el suelo eran más solubles que cuando la cal se había aplicado antes que el fósforo. Obsérvese (Cuadros 23 y 24), que el fósforo orgánico era más bajo cuando la cal se aplicaba después del fósforo. Igualmente, la síntesis del fósforo orgánico persistía hasta los 55 días, mientras que si la cal se aplicaba antes que el fósforo, había una mayor tendencia a la formación inicial del P-orgánico; pero la síntesis termina entre los 20 y 35 días.

Los resultados encontrados en este último experimento dan lugar a pensar que el tratamiento inicial con cal favorece la inmovilización. Quizás esta sea la explicación del porqué las diferentes formas de fósforo mineral sean más altas en el suelo donde primero se aplicó el P que la cal; no obstante los resultados que se encontraron en este experimento con el P-Fe son algo contradictorios y solo sirven de base para abrir nuevas investigaciones en lo que respecta a la importancia del hierro en muchas de las propiedades físico-químicas de estos suelos.

## 5. CONCLUSIONES

Los suelos de Carimagua responden bien a las aplicaciones de cal en cuanto a neutralización de acidez intercambiable se refiere. No obstante, parece que el efecto de la cal es más importante como fuente nutricional que como modificadora de la acidez. De acuerdo con esto, sería aconsejable iniciar estudios de aplicaciones de cal en las épocas de mayor demanda de calcio por la planta.

Las aplicaciones de fósforo, aumentan el pH de estos suelos posiblemente por la neutralización del aluminio intercambiable y por su efecto en otros factores no muy bien definidos que también afectan la acidez de dichos suelos.

Las formas de fósforo nativo de los suelos de Carimagua están representadas principalmente en orden decreciente por fosfatos orgánicos, fosfatos de hierro y fosfatos de aluminio. El fósforo presente en cada una de estas formas, se encuentra en cantidades muy bajas y las aplicaciones de cal no producen cambios aparentes en su solubilidad; por tanto, para cualquier tipo de planta, que se piense sembrar en estos suelos, aparentemente no es suficiente el hacer aplicaciones de cal, sino que también se hacen necesarias las aplicaciones de fertilizantes fosfatados.

El hierro presente en los suelos de Carimagua tiene más capacidad para fijar fósforo que el aluminio; pero a pesar de ello,

la planta toma con cierta facilidad los fosfatos de hierro pasándolos a formas aprovechables. Es decir, que indirectamente los fosfatos de hierro (posiblemente no nativos), constituyen una buena fuente de fósforo para las plantas y por consiguiente, es aconsejable buscar un método capaz de extraer altas cantidades de fósforo unido al hierro y correlacionarlo con la respuestas de la planta a la aplicación de fertilizantes fosforados.

Las aplicaciones de cal antes (principalmente) y después de aplicado el fósforo produjeron inmovilización de este elemento posiblemente por acción de los microorganismos. Sin embargo, dicha inmovilización no afectó el desarrollo de las plantas (probablemente por la alta cantidad de fósforo aplicado). Sería recomendable efectuar estudios de interacción cal-fósforo y establecer las cantidades mínimas de estos elementos que se requiere aplicar para que la inmovilización no afecte la disponibilidad del fósforo.

Las transformaciones que producen las aplicaciones de cal en las diferentes formas de fósforo mineral de los suelos de Carimagua son detectadas por los métodos de Bray II y Truog más no por el método de Olsen. Dado que en la zona estudiada, no existen calibraciones para el método de Truog, sería conveniente hacer estudios al respecto.

Parece que el calcio tiene un efecto directo sobre la traslocación del fósforo en la planta. Pues aunque el fósforo se encuentre

en forma disponible, si no se aplica calcio, el fósforo se concentra en las raíces sin traslocarse a la parte aérea. No obstante, también es factible que el hecho se deba posiblemente a un efecto tóxico del aluminio.

Cuando se hacen aplicaciones fuertes de fósforo (semejantes a la efectuada en el presente estudio), 3 toneladas/hectárea de  $\text{CaCO}_3$  parecen ser más que suficientes para nutrir la planta. Sin embargo, la cantidad de  $\text{CaCO}_3$  necesaria para neutralizar un alto porcentaje de la acidez intercambiable oscila entre 3 y 6 toneladas/hectárea.

## 6. RESUMEN

En el presente trabajo, se evaluó el efecto de la cal en la acidez y en diferentes formas de fósforo nativo y aplicado de un suelo de los Llanos Orientales de Colombia (Carimagua). Igualmente se determinó la relación de estas variaciones con el fósforo extraído por los métodos de Bray II, Olsen y Truog.

El estudio se llevó a cabo en el Invernadero del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (C.N.I.A.) de Palmira, sobre muestras de suelo tomadas a 30 centímetros de profundidad en la granja de Carimagua, localizada en los Llanos Orientales de Colombia. Como planta indicadora se utilizó el híbrido de maíz (Zea maiz) H-207.

En general, el suelo respondió bien a la aplicación de cal en cuanto a neutralización de aluminio intercambiable se refiere. No obstante, este aluminio también se neutralizó cuando se aplicó fósforo, lo cual se tradujo en un aumento del pH. Se encontraron buenas correlaciones entre el aluminio intercambiable y el pH; Sin embargo, se observó que fuera del aluminio existen otros factores que afectan la acidez de dichos suelos y que parcialmente pueden estar asociados con las aplicaciones de fósforo.

Los resultados tienden a indicar que posiblemente es más importante el efecto de la cal como nutriente que como correctivo de la acidez.

En los suelos donde no se aplicó cal, disminuyeron los rendimientos de las plantas; probablemente ello se encuentra asociado con el metabolismo del fósforo que se acumulaba en la raíz pero no fué traslocado a la parte aérea.

Se estableció que los suelos de Carimagua son extremadamente pobres en fósforo total y que las aplicaciones de cal no afectan la solubilidad del fósforo nativo.

Cuando se aplicó cal antes (principalmente) o después de tratar el suelo con fósforo, se incrementó la formación de fósforo orgánico y como consecuencia se presentó una inmovilización de este elemento en el suelo. Sin embargo, ello no pareció afectar el desarrollo de las plantas, ya que la cantidad de fósforo mineral presente cubrió las necesidades de dicho elemento por la planta.

Aparentemente el aplicar cal después del fósforo, dá como resultado un incremento en las formas solubles de fósforo.

Se encontró que posiblemente el hierro puede fijar más fósforo que el aluminio. No obstante los fosfatos de hierro parece que sirven como fuente indirecta de fósforo ya que las plantas pueden tomar con relativa facilidad pasándolos a formas más solubles.

Los cambios producidos en las formas minerales de fósforo por efecto del encalamiento, fueron detectados por los métodos de Bray II y Truog; no así por el de Olsen. Parece que las dos primeras soluciones extractoras funcionan satisfactoriamente en los suelos estudiados.

## B I B L I O G R A F I A

1. ABRUNA, F. et al. 1964. Effects of liming on yields and composition of heavily fertilized grasses on soil properties under humid tropical conditions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 657-661.
2. ALDRICH, D.G. and J.R. BUCHMAN. 1964. Phosphorus content of soils and their parent rocks in Southern California. Soil Sci. 77: 369-376.
3. ALEXANDER, T.G. and J.A. ROBERTSON. 1970. Ascorbic acid as a reductant for inorganic phosphorus determination in Chang and Jackson fractionation procedure. Soil. Sci. 110: 361-362.
4. APPELT, H. and E.B. SCHALSCHA. 1970. Effect of added phosphate on the inorganic phosphorus fractions of soils derived from volcanic ash. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 34: 599-602.
5. ARNON, D.I. et al. 1942. Hydrogen ion concentration in relation to absorption of inorganic nutrients by higher plants. Plant. Phys. 17: 515-524.

6. AWAN, A.B. 1964. Effect of lime on availability of phosphorus in Zamerano Soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28: 672-673.
7. BARROW, N.J. 1961. Phosphorus in soil organic matter. *Soil and Fertilizers.* 24: 169-173.
8. BATES, J.A.R. and T.C.N. BAKER. 1960. Studies on a Nigerian forest soil. II. Distribution of phosphorus in the profile and in various soil fractions. *Jour. Soil Sci.* 11: 257-265.
9. BEAR, F.E. 1955. *Chemistry of the soil.* New York. Reinhold publishing corporation. 373 p.
10. BENAVIDES, S.T. 1963. Distribution of native phosphorus and phosphorus sorption capacity of some tropical soils of Colombia, S.A. M.S. Thesis. Oklahoma State University, 103 p.
11. BLACK, C.A. and C.A. GORING. 1953. Organic phosphorus in soils. En *Soil and Fertilizers phosphorus*, ed. by W. H. Pierre and A.G. Norman. N.Y. Academic press, pp 123-152.

12. BLASCO, M.L. and N. BOHORQUEZ. 1968. Fractionations of phosphorus in tropical soils of Colombia. *Agrochimica* 12: 177-182.
13. BORNEMISZA, E. 1966. El fósforo orgánico en los suelos tropicales. Turrialba. 16: 33-38.
14. BORNEMISZA, E., L.S. VIEIRA and K.I. GUE. 1967. The method of Metha et al. Modified for determination of organic phosphorus in soils high in extractable iron. *Soil Sci. Sec. Amer. Proc.* 31: 576-577.
15. BOUNA, D. 1960. The effect of ammonium sulphate usage on the availability of soil phosphorus to citrus. *Australian Jour. Agric. Res.* 11: 292-303.
16. BRAY, R.H. and L.T. KURTZ. 1955. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59: 34-45.
17. BROADBENT, F.E., R.H. JACKMAN and J. McNICHOLL. 1964. Mineralization of carbon and nitrogen in some New Zealand allophanic soils. *Soil Sci.* 92: 118-128.

18. CABALA, P.R. y H.W. FASSBENDER. 1971. Efecto del encalado en las formas y disponibilidad de fosfatos en suelos de la región cacaotera Bahía Brasil. Turrialba, 21 (1): 38-46.
19. CERVANTES, O., A. LEON y G. MARIN. 1970. Relaciones entre pH, aluminio y materia orgánica en algunos suelos de Colombia. Rev. I.C.A. 5 (1): 43-64.
20. CHANG, S.C. and M.L. JACKSON. 1957. Fractionation of soil phosphorus. Soil Sci. 84: 133-144.
21. CLARKSON, D.T. 1966. Effect of Aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedling. Plant. Phys. 41: 165-172.
22. \_\_\_\_\_ 1967. Interactions between aluminum and phosphorus on soil surfaces and cell wall material. Plant and Soil. 27: 347-355.
23. COLEMAN, N.T., E.J. KAMPRATH and S.B. WEED. 1958. Liming. En Advances in Agronomy, 10: 417-475.

24. \_\_\_\_\_ J.L. RAGLAND and D. CRAIG. 1960. An  
unexpected reaction between Al-Clay or Al-Soil and  $\text{CaCl}_2$ .  
Soil Sic. Soc. Amer. Proc. 24: 419-420.
25. DAHNKE, W.C., J.L. MALCOM and M.E. MENENDEZ. 1964.  
Phosphorus fractions in selected soil profiles of El  
Salvador as related to their development. Soil Sci.  
98: 33-38.
26. DEAN, L.A. 1949. Fixation of soil phosphorus. En Advances  
in Agronomy. 1: 391-411.
27. FOY, C.D. and S.C. BROWN. 1963. Toxic factors in acid  
soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 27-32.
28. FOY, C.D. and S.C. BROWN. 1963. Toxic factors in acid  
soils. I. Characterization of Al-toxicity in cotton.  
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27: 403-407.
29. FRIEND, M.T. and H.F. BIRCH. 1960. Phosphate responses in  
relation to soil test and organic phosphorus. Journal of  
Agricultural Science. 54: 341-347.

30. FULLER, W.H. and W.T. McGEORGE. 1951. Phosphates in calcareous Arizona soils. II. Organic phosphorus content. Soil. Sci. 71: 45-49.
31. GHANI, M.O. 1943. Fractionation of soil phosphorus in soils. Soil Sci. 37: 343-355.
32. GORING, C.A. 1955. Biological transformation of phosphorus in soil. II. Factors affecting synthesis of organic phosphorus. Plant and Soil. 6: 26-37.
33. \_\_\_\_\_ and J.A. ZOELLNER. 1955. Biological Transformation of phosphorus in soil. III. Estimation of available soil phosphorus. Plant and Soil. 6: 38-44.
34. GUERRERO, R. 1971. Soils of the Colombian Llanos Orientales. Composition and Classification of selected Soil profiles. Ph.D. Thesis. Raleigh, North Carolina State University. 78 p.
35. GUPTA, M.L. and A.P. SINGH. 1969. Estudios on inorganic phosphorus fractions in Vanasi Soil. En Soil an Fertilizers. 33 (1): 6, 1970.

36. HANLEY, P.K. and M.D. MURPHY. 1970. Phosphate forms in particle size separates of Irish soils in relation to drainage and parent materials. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34: 587-590.
37. HEDDLESON, M.R. et al. 1960. Aluminium in soils. IV. The role of aluminium in soil acidity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 91-94.
38. HEMWALL, J.B. 1957. The fixation of phosphorus by soils. Advances in Agronomy. 9: 95-112.
39. \_\_\_\_\_ The role of soil clay minerals in phosphate fixation. Soil Sci. 83: 101-108.
40. HSU, P.H. and M.L. JACKSON. 1960. Inorganic phosphate transformation by chemical weathering in soil as influenced by pH. Soil Sci. 90: 16-24.
41. JACKMAN, R.J. 1955. Organic phosphorus in New Zealand soils under pasture. II. Relation between organic phosphorus content and some soil characteristics. Soil Sci. 79: 293-299.

42. JACKSON, M.L. 1963. Aluminum Bonding in Soils: A Unifying principle in Soil Science. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27: 1-10.
43. \_\_\_\_\_ 1960. Soil Chemical Analysis. 2 ed. N.Y. Prentice Hall, 498 p.
44. JOHNSON, C.M. and A. ULRICH. 1959. II. Analytical methods for use in plant analysis. En California Agricultural Experimentation. bull. M2-766, pp 31-32.
45. JUAN, T.L. 1960. Forms of Newly fixed phosphorus in three acid sandy soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 447-450.
46. KATZNELSON, H., E.A. PETERSON and J.W. ROVATT. 1962. Phosphate dissolving microorganisms seeds and in the root zone of plants. Canad. Jour. Botany 40: 1181.
47. KONONOVA, MM. 1966. Soil organic matter. 2 ed. Oxford. Pergamon Press, 544 p.
48. KURTZ, L.T. 1953. Inorganic phosphorus in acid and neutral soils. En Soil and Fertilizer Phosphorus. N.Y., Academic press. pp 59-88.

49. LAVERTY, J.C. and E.O. McLEAN. 1961. Factors affecting yields and uptake of phosphorus by different crops: 3 kind of phosphate - native, applied and formed. Soil Sci. 91: 166-171.
50. LEGG, J.O. and C.A. BLACK. 1955. Determination of organic phosphorus in soils. II. Ignition method. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 19: 139-143.
51. LEON, A. 1967. Chemistry of some tropical acid soils of Colombia, S.A. Ph.D. Dissertation. Riverside. University of California. 191 p.
52. \_\_\_\_\_ 1964. Estudios químicos y mineralógicos de diez suelos de Colombia. Agricultura Tropical. 20: 442-451.
53. LINDSAY, W.L. and E.C. MORENO. 1960. Phosphate phase equilibria in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 177-182.
54. LOTT, W.L. et al. 1956. Leaf analysis technique in coffee research. New York, IBEC. 26 p.

55. MACK, A.R. and S.A. BARBER. 1960. Influence of temperature and moisture on soil phosphorus. I. Effect on soil phosphorus fractions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 381-385.
56. MARTINI, J.A. 1968. Algunas notas sobre el problema del encalado en los suelos del trópico. Turrialba. 8 (3): 249-256.
57. MEHTA, N.C. et al. 1954. Determination of organic phosphorus in soils. I. Extraction method. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 18: 443-449.
58. MORTENSEN, J.L. and F.L. HINES. 1964. Soil organic matter. En Chemistry of the soil. 2 ed. by F.C. Bear, N.Y. Reinhold Publisher Corporation, pp 206-241.
59. MURRMANN, R.P. and M. PEECH. 1968. Reaction products of applied phosphorus in limed soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 32: 493-496.
60. MUTATKAR, V.K. and W.L. PRITCHETT. 1966. Influence of added aluminum on carbon dioxide production in tropical soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 30: 343-346.

61. OCHSE, J.J. et al. 1965. Cultivo y mejoramiento de plantas tropicales y subtropicales. México. Limusa Wiley, pp 258-265.
62. OLSEN, R.S. and L.A. DEAN. 1965. Phosphorus. En methods of soil analysis. Part 2. American Society of Agronomy. Wisconsin, Publisher Madison, pp. 1044-1047.
63. ONKEN, A.B. and L.W. REED. 1962. The fate of phosphorus from superphosphate and rock phosphate in soil. Agronomy Abstracts. 16.
64. OSPINA, O. 1967. Aluminum organic matter complexes of the horizons of some acid soils. Ph.D. Dissertation. Riverside University of California.
65. PRATT, P.F. 1961. Phosphorus and aluminum interacciones in the acidification of soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 25: 28: 23-26.
66. \_\_\_\_\_ and M.J. CARBER. 1964. Correlations of phosphorus availability by chemical test with inorganic phosphorus fractions. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 23-26.

67. RANDALL, P.J. and P.B. VOSE. 1963. Effect of Aluminum on uptake and traslocation of phosphorus 32 by perennial Ryegrass. Plant Phys. 38: 403-409.
68. REEVE, G.N. and M.E. SUMNER. 1970. Lime requeriment of natal oxisol based on exchangeable Aluminum. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34: 595-598.
69. RIOS, M.A. and R.W. PEARSON. 1964. The effect of some chemical environmental factors on cotton root behabior. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 232-235.
70. RIOS, V., J.A. MARTINI y R. TEJEIRA. 1968. Efecto del encalado sobre la acidez y el contenido de aluminio y hierro extractable en nueve suelos de Panamá. Turrialba 18 (3): 139-146.
71. ROBERTSON, E.W. and C.E. NUTTON. 1960. Retention of fertilizers elements in red fine sandy loam. Soil and Crop Sci. Sec. of Fla. Proc. 20: 158-166.
72. RUSSELL, E.W. 1961. Soil conditions and plant growth. 9 ed. N.Y. Wiley and Sons, 688 p.

73. SAMPER, A. et al. 1959. Levantamiento Agrológico de los Llanos Orientales. Bogotá. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Publicación EE4.
74. SAUNDERS, W.M.H. and E.G. WILLIAMS. 1955. Observations on the determination of total organic phosphorus in soils. Jour Soil Sci. 6 (2): 254-267.
75. SEN-GUPTA, M.B. and A.H. CORNFIELD. 1963. Phosphorus in calcareous soils. II. Determination of organic phosphorus content of calcareous soils and its relation to soil calcium carbonate content. Jour Sci. Food and Agric. 13: 115-123.
76. \_\_\_\_\_ . Phosphorus in calcareous soils. Jour Sci. Food Agric. 13: 652-655.
77. SILLAMPAA, M. 1961. The effect of liming on the solubility of phosphorus in a muddy clay soil. En Soil Fertilizers, 25: 181.
78. SUSUKI, A. et al. 1962. Phosphorus uptake and soil tests as related to forms of phosphorus in some Michigan Soils. Agronomy Abstracts. 43.

79. TAFUR, N. 1959. Fraccionamiento de fósforo en algunos suelos del Valle del Sinú. Córdoba. Rev. ICA. 4 (2): 59-71.
80. THOMPSON, L.M., C.A. BLACK and J.A. ZOELLNER. 1954. Occurrence and mineralization of organic phosphorus in soils with particular reference to associations with nitrogen, carbon and pH. Soil Sci. 77: 185-196.
81. TISDALE, S.L. and W.L. NELSON. 1966. Soil Fertility and Fertilizers. 2 ed. N.Y. McMILLAN, 694 p.
82. TRUOG, E. 1953. Liming in relation to availability of native and applied phosphates. En Soil and Fertilizers Phosphorus. Agronomy. A series of monographs. N.Y. Academic Press, pp 281-297.
83. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. 1960. Soil Classification a comprehensive system. 7<sup>th</sup> Approximation. 265 p.
84. VANDIEST, A. 1959. Soil organic phosphorus and plant growth. II. Organic phosphorus mineralized during incubation. Soil Sci. 87: 145-154.

85. \_\_\_\_\_ and C.A. BLACK. 1959. Soil organic phosphorus and plant growth. I. Organic phosphorus hydrolysed by alkali and hypobromite treatments. Soil Sci. 87: 100-104.
86. VIEIRA, I.S. y E. BORNEMISZA. 1968. Categorías del fósforo en los principales grandes grupos de suelos en la Amazonía del Brasil. Turrialba. 18 (3): 242-248.
87. VOLK, W.V. and E.O. McLEAN. 1961. Availability of phosphorus to plants and kinds of phosphates formed in four Ohio Soils, according to the rate of application. Agronomy Abstracts, 28.
88. WALKER, T.W. and A.F. ADAMS. 1958. Studies on soil organic matter. I. Influence of phosphorus content of parent materials on an accumulation of carbon, nitrogen, sulphur and organic phosphorus in grassland soils. Soil Sci. 85: 307-318.
89. WILLIAMS, C.J., E.G. WILLIAMS and M.N. SCOTT. 1960. Carbon, nitrogen, sulphur and phosphorus in some scottish soils. Jour of Soil Sci. 11: 334-346.

90. WILLIAMS, E.G. and W.M. SAUNDERS. 1956. Distribution of phosphorus in profiles and particles size fractions of some scottish soils. Jour of Soil Sci. 7: 90-108.
91. WRIGHT, K.E. and B.A. DONAHUE. 1953. Aluminum toxicity studies with radioactive phosphorus. Plant Phys. 28: 674-680.
92. YUAN, T.L. 1963. Some relationships among hydrogen, aluminum and pH in solution and soil systems. Soil Sci. 95: 155-163.
93. \_\_\_\_\_, W.K. ROBERTSON and J.R. NELLER. 1960. Forms of newly fixed phosphorus in three acid sandy soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24: 447-450.