

## NEUTRALIZACION DEL ALUMINIO INTERCAMBIABLE Y APROVECHAMIENTO DEL FOSFORO EN TRES SUELOS DE COSTA RICA.<sup>1</sup> \*

Salvador Quirós\*\* y Miguel A. González\*\*\*

### ABSTRACT

Exchangeable aluminum neutralization and phosphorous uptake in three Costa Rican soils. Three acid soils from Costa Rica were treated with increasing amounts of lime to neutralize 0, 0.75, 1.50, 2.25, and 3 times their 1 N KCl extractable acidity. After incubation during 16 weeks, phosphorous fertilizer was added in increasing amounts, that is, 0, 0.75, 1.50, 2.25, 3.00 and 3.75 times the minimum concentration of phosphorous obtained from fixation curves. Sorghum (*Sorghum vulgare* L.) was used as indicator plant. Other nutrients were supplied in adequate amounts to the plants. Liming and phosphorous fertilization response was evaluated by means of the dry matter production, the availability of some nutrients, and the effect on the chemical characteristics of the soils.

Liming caused an increase in pH, calcium content in plants, and phosphorous uptake by plants. In the other hand, a decrease was caused in the concentration of aluminum, potassium, magnesium, iron, and manganese in the soils. The highest yields of dry matter were obtained in two of the soils, when neutralized 1.5 and 2.25 times the amount of exchangeable aluminum, and in the other soil when neutralized 3 times the same amount, and when the highest amounts of phosphorous were applied, that is, 3.00 and 3.75 times the fixing capacity of this element by the soils.

It was concluded that the low fertility levels of these soils are due not only to the calcium deficiency and aluminum toxicity, but also to the relatively low amounts of native phosphorous under these conditions.

### INTRODUCCION

La meteorización intensiva y la acidificación resultante son procesos normales en los trópicos que

conducen a bajos contenidos de bases y a altas concentraciones de aluminio, y a veces de hierro y manganeso. La acidificación es provocada por la lixiviación de bases, la remoción de cationes por las plantas y la aplicación de fertilizantes de efecto residual ácido (20).

1. Recibido para su publicación el 28 de febrero de 1979.

\* Parte de la tesis de grado presentada por el primer a la Escuela de Fitotecnia, Universidad de Costa Rica.

\*\* Cámara de Productores de Caña de San Carlos.

\*\*\* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.

En algunas regiones de Costa Rica la acidez es un factor limitante de la producción agrícola, tanto como factor directo como indirecto. No sólo es importante considerar el efecto directo de la acidez en la improductividad de los suelos, sino que también se señala la importancia que tienen los efectos indirectos sobre algunas características, ta-

les como la disminución en la disponibilidad de algunos elementos esenciales y la solubilidad excesiva de otros, hasta alcanzar niveles tóxicos para las plantas.

Bajo condiciones de altas concentraciones de aluminio de cambio, en el suelo, tanto el fósforo natural como el que se aplica en forma de fertilizante, es insolubilizado en gran parte a formas no utilizables por las plantas.

El objetivo del presente trabajo fue estudiar el efecto de diferentes grados de neutralización de la acidez de cambio por medio de encalado, sobre el aprovechamiento de cantidades crecientes de fósforo, en tres suelos ácidos de Costa Rica.

### MATERIALES Y METODOS

El experimento se llevó a cabo en invernaderos del Ministerio de Agricultura y Ganadería, en Gualalupe de Goicoechea, San José.

Se usaron suelos similares a los estudiados por Serpa y González (25) en otro estudio sobre encalado. Las muestras de suelo se tomaron a una profundidad de 0-30 cm. En el Cuadro 1 se describen algunas características de los suelos.

Una vez en el laboratorio, los suelos fueron secados al aire, mortarizados, pasados por un tamiz de 2 mm y homogeneizados. El diseño experimental usado fue un arreglo factorial irrestrictamente al azar con tres suelos, cinco dosis de cal, seis de fósforo y dos repeticiones.

Inicialmente los suelos fueron incubados con dosis crecientes de cal, calculadas con base en los miliequivalentes de aluminio extraídos con KC1 1 N (16). En el Cuadro 2 se presentan los tratamientos de cal empleados para neutralizar 0, 0,75, 1,50, 2,25 y 3 veces la cantidad de aluminio de cambio. Durante el período de incubación (tres meses), los suelos fueron sometidos a tres humedecimientos y secados alternos. Una vez alcanzado el equilibrio

**Cuadro 1. Ubicación, clasificación y algunas características físicas y químicas de los suelos.**

	SUELOS		
	1	2	3
Ubicación	San Isidro de El General, Pérez Zeledón	San Isidro de El General, Pérez Zeledón	Pital San Carlos
Clasificación	Typic Paleustult	Typic Rhodustult	Typic Haplustult
Arena (%)	24	30	27
Limo (%)	28	23	29
Arcilla (%)	48	47	44
Materia orgánica (%)	2,9	2,0	2,7
pH en H <sub>2</sub> O	4,7	4,9	4,3
P (ug/ml)	4	3	4
K (meq/100 ml)	0,3	0,25	0,3
Ca "	1,5	2,5	1,5
Mg "	0,3	0,7	0,5
Al (meq/100 ml)	2,5	1,25	4,3
CIC (meq/100 ml)	4,6	4,7	6,6
Saturación de bases (%)	45	73	35
Saturación con Al (%)	55	27	65
Fe (ug/ml)	168	46	430
Cu "	4	17	26
Zn "	1,2	2	9
Mn "	3	12	31,5

de neutralización se procedió a agregar los tratamientos de fósforo los cuales se calcularon a partir de curvas de fijación de este elemento, que consisten en aplicar cantidades crecientes de fósforo a una muestra de suelo y extraer de ésta, el fósforo disponible (15). Con los datos obtenidos se trazó una curva de fijación. La capacidad de fijación del suelo se calculó como la cantidad de fósforo que fue necesario agregar a éste para extraer 15  $\mu\text{g}/\text{ml}$  de fósforo disponible. Esta cantidad se usó como base para calcular los tratamientos de fósforo, al multiplicar 15  $\mu\text{g}/\text{ml}$  por 0,75, 1,1,50, 2,25, 3,00 y 3,75, según se presentan en el Cuadro 2. La adición de los otros nutrimentos se llevó a cabo siguiendo la metodología sugerida por Hunter (15).

Los suelos tratados se colocaron en macetas de plástico de 1 litro, en las que se sembraron veinte semillas de sorgo (*Sorghum vulgare* L.) como planta indicadora, debido a su sensibilidad a la acidez y a su rápido crecimiento. Posteriormente se

arraló a diez plantas. A las ocho semanas se cortó, tomando todas las plantas para el análisis posterior y para evaluar la producción de materia seca por maceta. Se tomaron además, muestras de suelo para los análisis posteriores.

El pH se determinó por medio de un potenciómetro Seybold modelo 6TB, en una relación suelo: agua de 1:2. El fósforo se extrajo con solución Olsen modificada y luego se desarrolló color y se leyó a 660  $\mu$  en un espectrofotómetro Perkin Elmer modelo 295 (15). Con una solución de KC1 1 N se extrajo aluminio, calcio y magnesio, mientras que el potasio fue extraído con la solución Olsen modificada. Las determinaciones se hicieron leyendo directamente del extracto en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer modelo 303, excepto el aluminio que se determinó por titulación con NaOH 0,01 N.

Con la solución Olsen modificada se extrajeron además, zinc y manganeso, que se leyeron directamente en un espectrofotómetro de absorción atómica. La capacidad de intercambio de cationes se determinó por el método de la suma de los cationes calcio, magnesio, potasio y aluminio.

La materia orgánica fue determinada por el método de Walkley y Black, basado en la oxidación con dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado y titulación con sal de Mohr, según lo sugieren Saíz del Río y Bornemisza (22). La arena, limo y arcilla fueron determinados por el método de Bouyoucos (5).

Las muestras de materia seca fueron sometidas a digestión húmeda con una mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico en relación 5:1 respectivamente y luego analizadas en cuanto a contenido de fósforo, potasio, calcio y magnesio.

Cuadro 2. Tratamientos con carbonato de calcio y fósforo.

Grado de neutralización de aluminio	SUELO		
	1	2	3
	meq/100 ml		
0	0,00	0,00	0,00
0,75	1,88	0,94	3,22
1,50	3,75	1,88	6,45
2,25	5,62	2,81	9,68
3,00	7,50	3,75	12,60
Dosis de aplicación de fósforo (meq/ml)	ppm		
0,00	0	0	0
0,75	43	85	83
1,50	100	178	155
2,25	137	270	200
3,00	215	362	242
3,75	273	455	285

El material usado para el encalado fue carbonato de calcio calidad reactivo y el fósforo se suplió como solución de ácido fosfórico.

## RESULTADOS Y DISCUSION

Efecto del encalado y de la fertilización con fósforo sobre algunas características químicas de los suelos.

La aplicación de cantidades crecientes de cal provocó un aumento en el pH de los tres suelos y esta tendencia se mantuvo aún con la mayor dosis de neutralización de aluminio usada, como puede

observarse en la Fig. 1. Esto concuerda con lo encontrado por Serpa y González (25), Fassbender (8) y Braga *et al* (6) en otros suelos. El aumento fue provocado por el incremento en el porcentaje de saturación de bases ya que el contenido de calcio aumentó de acuerdo a la cantidad de cal aplicada en los tres suelos, como se observa en la Fig. 2.

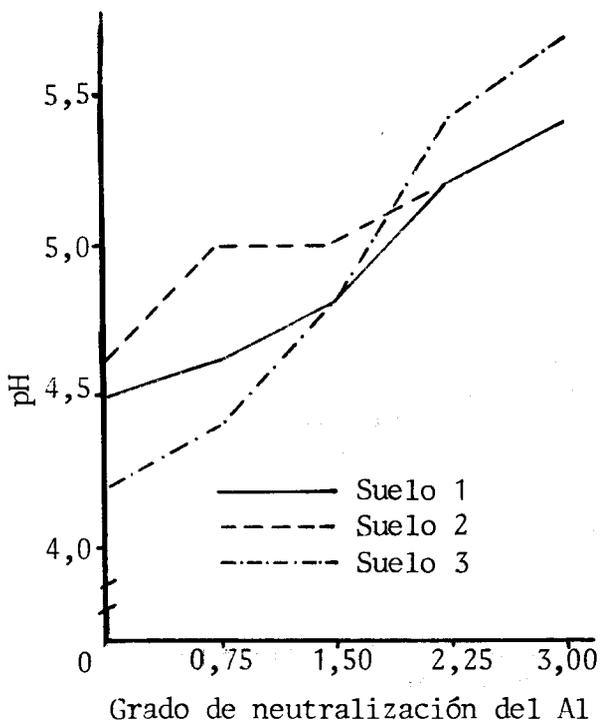


Fig. 1. Variaciones del pH en relación al encalado.

El fósforo no presentó variaciones de consideración cuando se incrementaron las cantidades de cal agregadas al suelo, debido probablemente a las cantidades bajas del fósforo nativo. Al aplicar al suelo cantidades crecientes de fósforo, su concentración aumentó en forma lineal. El contenido de magnesio disminuyó ligeramente conforme aumentó la cantidad de cal aplicada, en los tres casos, tal como se muestra en la Fig. 2. Esto se debió posiblemente a que hubo una mayor utilización de este elemento a causa de mayor crecimiento vegetal ocurrido cuando se aumentó la cantidad de cal aplicada. Braga *et al* (6) encontraron un resultado similar.

El contenido de potasio disminuyó con la aplicación de mayores cantidades de cal; en el suelo 1 el contenido bajó drásticamente y luego se estabilizó; en el suelo 2 se mostró una pequeña cresta con la segunda dosis, debida posiblemente a error experimental, y en el suelo 3 hubo un ligero aumento con la dosis 4 que pudo deberse a la misma causa.

De Kock (7) encontró resultados semejantes y agrega que este fenómeno sólo es posible si el contenido de potasio es bajo en el suelo. Bornemisza (4) y Shaw (26) encontraron un aumento en el contenido de potasio conforme aumentó la dosis de encalado.

El aluminio sufrió una disminución severa al aumentar la cantidad de cal aplicada al suelo, en los tres casos (Fig. 2). El nivel de neutralización correspondiente a 2,25 veces el aluminio de cambio en los tres suelos redujo la concentración de aluminio a 0,2 meq/100 ml, similar a lo encontrado por Serpa y González (25). En suelos con sistemas oxídicos el pH aumenta en forma moderada al aplicar cal (3) mientras que el aluminio intercambiable decrece (11, 16, 21); estos cambios ocurren con dosis de cal relativamente pequeñas, lo cual concuerda con los resultados del presente estudio. En la Fig. 3 se puede observar que cuando el pH aumenta en los suelos, ocurre una disminución en el contenido de aluminio y que arriba de pH 5,3 el contenido de aluminio bajó a niveles inferiores de 0,3 meq/100 ml.

El contenido de hierro disminuyó conforme aumentó la cantidad de cal aplicada al suelo. El suelo 2 mostró una variación pequeña en el contenido de este elemento quizá debido a su bajo contenido de hierro, como se muestra en el análisis inicial. Los suelos 1 y 3, con contenidos mayores de hierro, exhibieron una fuerte disminución (Fig. 4), similar a lo encontrado por varios autores a pH mayor de seis (7,9,13,24,28).

La tendencia del manganeso fue decreciente conforme aumentó la cantidad de cal aplicada a los suelos, según se nota en la Fig. 4. Algunos autores (24,27) mencionan que este comportamiento ocurre para hierro, el cobre y el zinc, no obstante, en el presente estudio las variaciones de estos elementos no fueron claras.

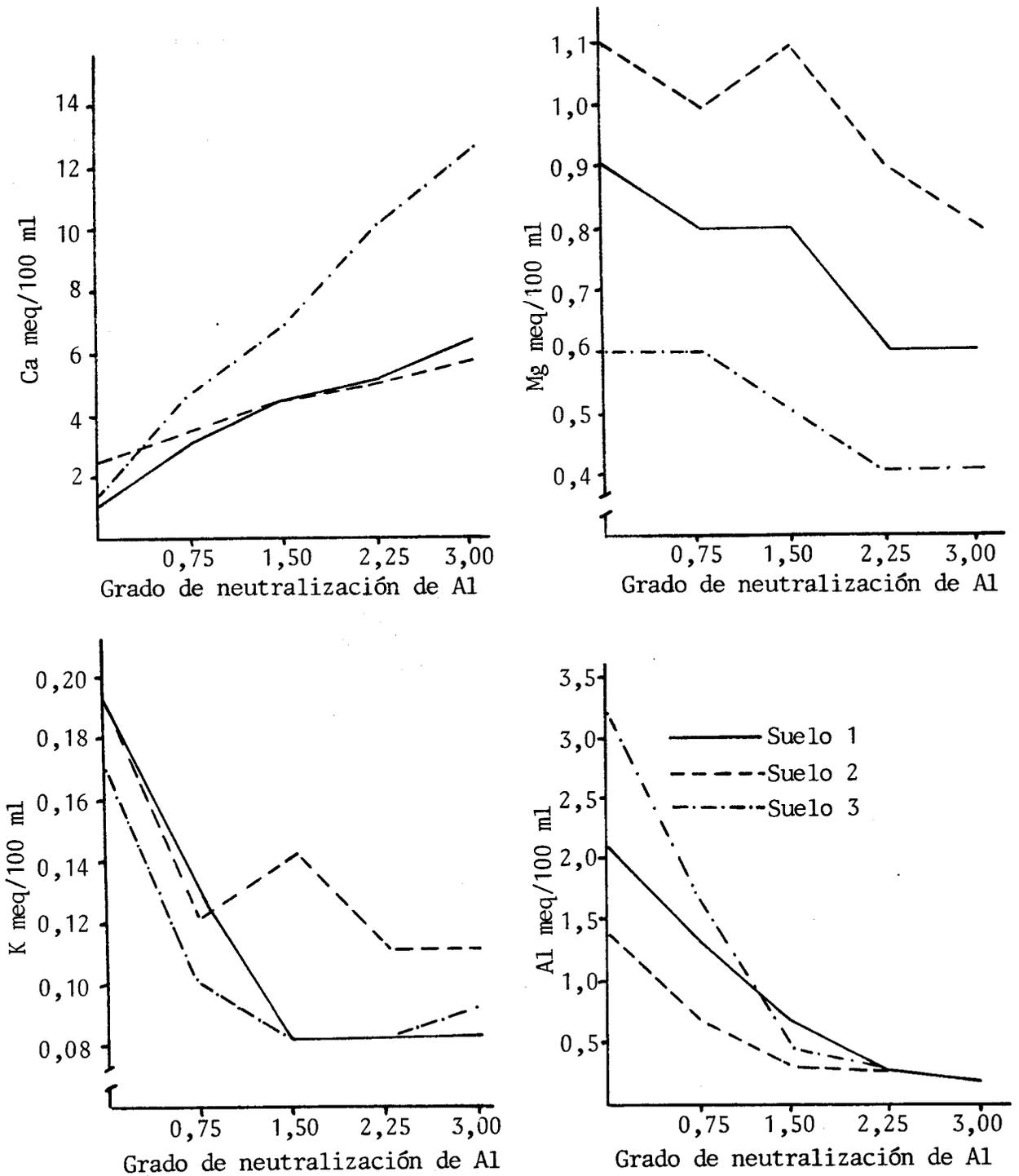


Fig. 2. Comportamiento del Ca, Mg, K y Al intercambiable en relación al encalado.

El potasio mostró una tendencia a disminuir con las dosis de fósforo aplicadas (Fig. 5). El comportamiento del hierro fue variable en los tres suelos. Los suelos 2 y 3 exhibieron poca variación con respecto a las dosis de fósforo aplicadas mientras que el suelo 1 mostró un aumento en el contenido de hierro.

#### Efecto del encalado y de la fertilización con fósforo sobre el crecimiento del sorgo.

Los resultados de la prueba de invernadero se incluyen en el Cuadro 3. Se deduce que las cantidades de cal y fósforo usadas en este estudio provocaron incrementos en la producción de materia seca. Los suelos 2 y 3 mostraron incrementos notables con los grados de neutralización de aluminio correspondientes a 1,50 y 2,25, a partir de los cuales la producción aumentó poco, o decreció. En el suelo 1 los mayores incrementos ocurrieron con los grados de neutralización de aluminio de 2,25 y 3,00.

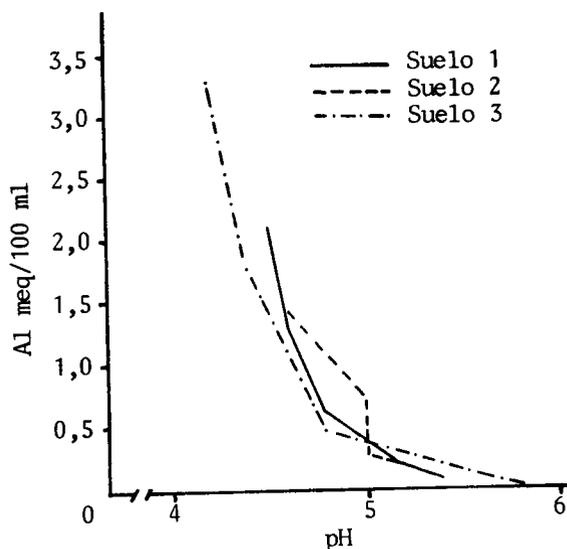


Fig. 3. Variaciones del Al intercambiable en relación al pH.

Con las dosis más bajas de neutralización de aluminio el aumento en producción de materia seca, por efecto del fósforo, no fue tan evidente, debido

a que al no haber sido neutralizado el aluminio, el fósforo, no fue tan evidente, debido a que al no haber sido neutralizado el aluminio, el fósforo era fijado parcialmente a todas las dosis aplicadas.

El fósforo aumentó la producción de materia seca hasta llegar a la dosis de 3,00 para los suelos 2 y 3, no así para el suelo 1, en el cual al aplicar mayores cantidades de fósforo y cal conjuntamente, se aumentó más la producción.

La mayor producción de materia seca se obtuvo en los suelos 2 y 3 con la neutralización de aluminio de 2,25 y 3,00 y las dosis de fósforo de 3,00 y 3,75. En el suelo 1 ocurrió con la neutralización de 3,00 y la dosis de 3,75 de fósforo. En este caso parece necesario investigar el efecto de dosis mayores de cal y fósforo.

La baja producción de materia seca obtenida con los primeros grados de neutralización de aluminio para las diferentes dosis de fósforo concuerdan con la literatura (11, 12, 14, 23 y 28).

Serpa y González (25) y Laroche (18) reportan mayor producción de materia seca conforme se aumenta la cantidad de cal, lo que concuerda con los resultados del presente estudio. Ayres (1) y Mikkelsen *et al* (19) corroboraron lo anterior, estableciendo que la cal actúa como mineralizador y solubilizador de fósforo.

Conforme se neutralizó el aluminio, aplicaciones mayores de fósforo provocaron aumentos en la producción de materia seca, al haber una mejor utilización del fósforo por las plantas, llegando a un punto máximo a partir del cual ocurrió una baja debida posiblemente a una interacción fósforo-zinc.

La concentración de fósforo en tejidos foliares (Cuadro 4) aumentó con los grados de neutralización de aluminio, en los suelos 2 y 3. En el suelo 1 decreció a partir de los grados de 1,50 y 2,25. La fertilización fosfórica aumentó la concentración foliar de este elemento, llegando a valores máximos con las dosis 1,50 y 2,25 en los suelos 2 y 3, y con la dosis 3,75 en el suelo 1. La mayor concentración de fósforo se obtuvo con el grado de neutralización de aluminio de 3,00 y la dosis 2,25 de fósforo en los suelos 2 y 3 y la dosis 3,75 en el suelo 1.

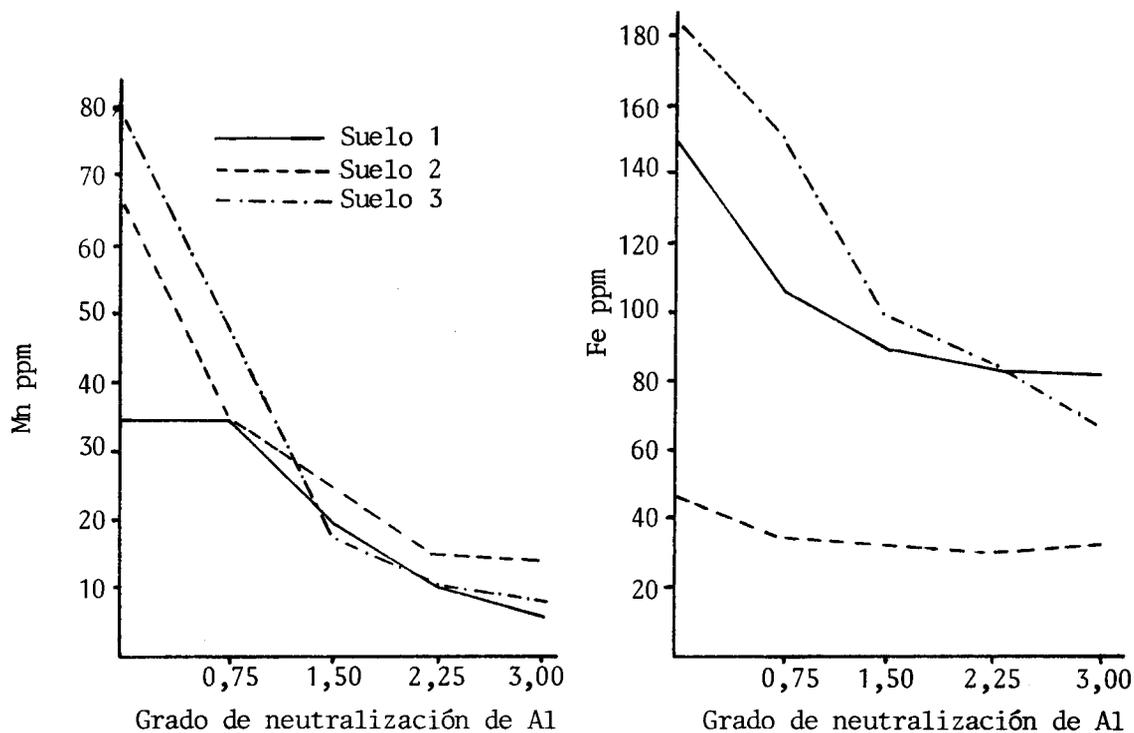


Fig. 4. Comportamiento del Mn y del Fe en el suelo en relación al encalado.

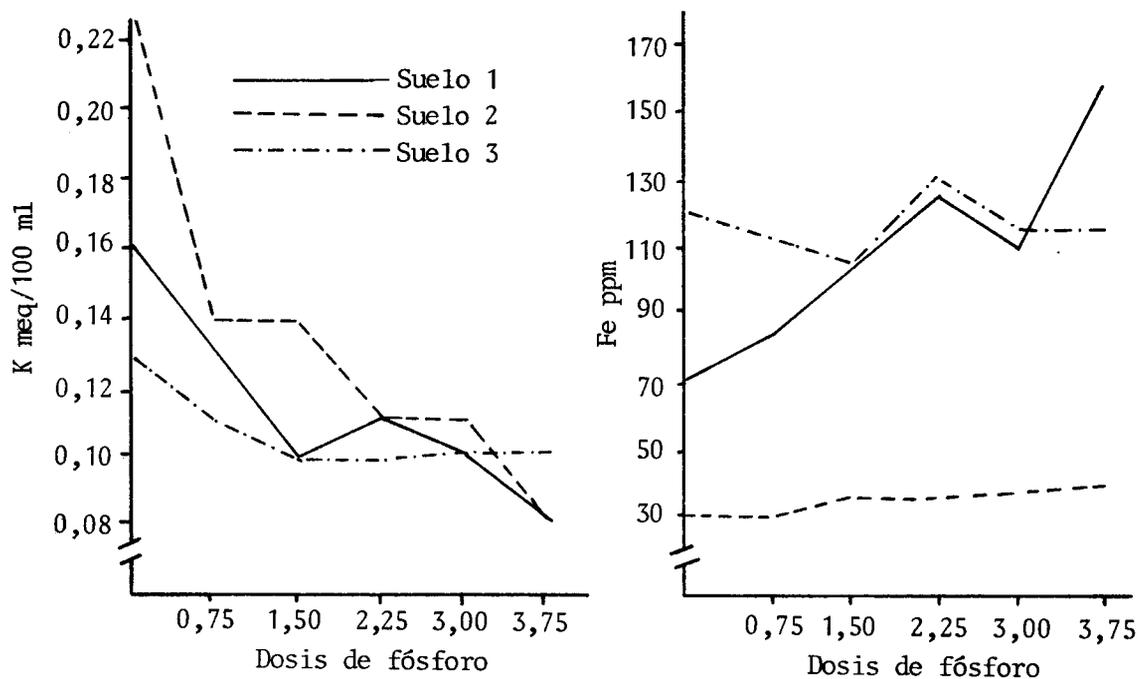


Fig. 5. Comportamiento del K y el Fe en el suelo en relación a las dosis de fósforo.

Los grados de neutralización del aluminio aumentaron la concentración de calcio en los tejidos foliares (Cuadro 5). No obstante, los aumentos fueron mayores en los suelos 2 y 3 con los mayores grados de neutralización. Las aplicaciones de fósforo, en los suelos 2 y 3, aumentaron la concentración de calcio foliar hasta la dosis 1,50 a partir de la cual disminuyó debido posiblemente a la formación de fosfatos de calcio. En el suelo 1, la concentración de este elemento decreció hasta la dosis 1,50 de fósforo, y luego se produjo un aumento. La mayor concentración de calcio se obtuvo, en los suelos 2 y 3, con el grado de neutralización de aluminio de 3,00 y las dosis 0,75 y 1,50 de fósforo; en el suelo 1 con el grado de neutralización de 3,00 y la dosis 3,75 de fósforo.

En los suelos 2 y 3 la neutralización del aluminio, en ausencia de fósforo aumentó la concentración de potasio en los tejidos analizados (Cuadro 6), y este incremento fue menor conforme aumenta dosis de fósforo hasta un límite en el cual causó disminución.

Al aumentar los grados de neutralización de aluminio y las dosis de fósforo conjuntamente, se produjo una disminución en la concentración de potasio. En el suelo 1 la concentración de potasio aumentó hasta alcanzar el grado 1,50 de neutralización de aluminio.

El fósforo causó una disminución en la concentración de potasio hasta la dosis 1,50, a partir de la cual ocurrió un aumento, en los suelos 2 y 3. En el suelo 1 las dosis de fósforo redujeron la concentración de potasio.

La concentración mayor de potasio se obtuvo en los suelos 2 y 3 cuando no se neutralizó el aluminio y se aplicó la dosis 3,25 de fósforo, y en el suelo 1, con la dosis 0 de fósforo y la neutralización de 1,50 veces el aluminio.

La concentración de magnesio (Cuadro 7) aumentó con la neutralización de aluminio en los suelos 2 y 3. En el suelo 1, el incremento llegó hasta el grado de neutralización de 1,50. Este elemen-

**Cuadro 3.** Producción de materia seca en g/maceta, en relación al encalado y a la fertilización fosfórica.

Grado de neutralización de aluminio	Dosis de aplicación de fósforo $\mu$ g/ml						Prom
	0,00	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75	
Suelo 1							
0,00	0,15	0,13	0,16	0,14	0,17	0,17	0,15
0,75	0,94	0,81	1,19	0,97	1,59	1,83	1,22
1,50	0,95	1,48	3,04	5,03	4,90	7,55	3,82
2,25	1,02	1,03	3,75	6,32	8,74	7,31	4,70
3,00	1,04	2,53	5,31	6,98	7,26	7,02	5,02
Prom	0,82	1,20	2,69	3,89	4,53	4,78	
Suelo 2							
0,00	0,77	0,73	0,92	1,43	1,42	1,30	1,10
0,75	1,05	1,64	3,06	3,27	5,58	5,15	3,29
1,50	0,85	3,41	3,29	3,98	6,15	4,38	3,68
2,25	0,85	2,33	5,53	5,18	5,74	6,02	4,28
3,00	0,82	2,69	3,19	5,47	5,95	4,61	3,79
Prom	0,87	2,16	3,20	3,87	4,97	4,29	
Suelo 3							
0,00	0,32	0,70	0,31	0,28	0,29	0,25	0,36
0,75	0,83	1,74	2,78	3,38	4,05	2,99	2,73
1,50	0,81	2,20	5,37	7,15	7,44	5,93	4,82
2,25	0,77	4,34	5,04	7,53	9,66	6,49	5,64
3,00	0,77	1,67	7,66	8,20	7,17	5,08	5,11
Prom	0,70	2,13	4,25	5,31	5,72	4,15	

**Cuadro 4.** Concentración de fósforo en tejidos foliares (%) en relación al encalado y a la fertilización fosfórica.

Grado de neutralización de aluminio	Dosis de aplicación de fósforo $\mu\text{g/ml}$						
	0,00	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75	Prom.
	Suelo 1						
0,00	0,20	0,22	0,28	0,23	0,27	0,34	0,26
0,75	0,20	0,28	0,20	0,22	0,20	0,60	0,28
1,50	0,38	0,42	0,42	0,43	0,33	0,52	0,42
2,25	0,15	0,24	0,36	0,43	0,22	0,56	0,33
3,00	0,22	0,21	0,29	0,23	0,44	0,75	0,36
Prom	0,23	0,27	0,31	0,31	0,29	0,55	
	Suelo 2						
0,00	0,24	0,16	0,28	0,24	0,23	0,38	0,26
0,75	0,21	0,64	0,68	0,44	0,58	0,29	0,47
1,50	0,20	0,12	0,39	0,45	0,18	0,35	0,28
2,25	0,24	0,28	0,54	0,73	0,58	0,30	0,44
3,00	0,30	0,57	0,58	0,32	0,55	0,32	0,44
Prom	0,24	0,35	0,49	0,44	0,42	0,33	
	Suelo 3						
0,00	0,16	0,18	0,38	0,12	0,16	0,22	0,20
0,75	0,26	0,44	0,56	0,50	0,52	0,26	0,42
1,50	0,20	0,28	0,23	0,49	0,52	0,24	0,33
2,25	0,32	0,41	0,46	0,42	0,54	0,26	0,40
3,00	0,62	0,28	0,36	0,38	0,66	0,26	0,43
Prom	0,31	0,32	0,40	0,38	0,48	0,25	

to aumentó con las dosis de fósforo en los suelos 2 y 3, mientras que en el suelo 1 hubo una disminución a partir de la dosis 2,25.

La mayor concentración de magnesio se obtuvo, en los suelos 2 y 3, con el grado de neutralización de 3,00 y la dosis 3,75 de fósforo; en el suelo 1, con la neutralización de 1,50 del aluminio y 2,25 de fósforo. En este estudio se encontró que la neutralización del aluminio extraíble en  $\text{KC1/N}$ , no necesariamente va a provocar una mayor utilización del fósforo nativo de los suelos. En algunos casos será necesario aplicar fósforo como fertilizante, una vez que el suelo ha sido encalado.

#### RESUMEN

Se incubó tres suelos ácidos: dos de San Isidro de El General y uno de Pital de San Carlos con do-

sis crecientes de cal, de acuerdo a la cantidad de aluminio de cambio presente. Se neutralizó con carbonato de calcio 0, 0,75, 1,50, 2,25 y 3,00 veces la cantidad de aluminio de cambio extraída con  $\text{KC1 1N}$ . Después de dieciséis semanas los suelos fueron tratados con cantidades crecientes de fósforo, teniendo como referencia las curvas de fijación de este elemento. Se usaron tratamientos con 0, 0,75, 1,50, 2,25, 3,00 y 3,75 veces la cantidad mínima obtenida de las curvas. Los demás elementos nutritivos fueron suministrados en cantidades adecuadas.

La respuesta al encalado y a los tratamientos con fósforo fue evaluada conjuntamente por medio de la producción de materia seca de plantas de sorgo crecidas en dichos suelos. También se evaluó el efecto de estos tratamientos sobre la disponibilidad de algunos elementos y propiedades químicas de los suelos.

Cuadro 5. Concentración de calcio en tejidos foliares (%) en relación al encalado y a la fertilización fosfórica.

Grado de neutralización de aluminio	Dosis de aplicación de fósforo $\mu\text{g/ml}$						Prom.
	0,00	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75	
Suelo 1							
0,00	0,10	0,06	0,08	0,06	0,06	0,08	0,07
0,75	0,24	0,09	0,10	0,12	0,08	0,53	0,19
1,50	0,68	0,41	0,12	0,67	0,10	0,72	0,45
2,25	0,65	0,62	0,64	0,66	0,70	0,69	0,66
3,00	0,57	0,42	0,41	0,34	0,58	0,82	0,52
Prom	0,45	0,32	0,27	0,37	0,30	0,57	
Suelo 2							
0,00	0,34	0,30	0,30	0,37	0,37	0,20	0,31
0,75	0,48	0,45	0,53	0,46	0,44	0,30	0,44
1,50	0,43	0,31	0,55	0,44	0,38	0,30	0,40
2,25	0,56	0,50	0,51	0,44	0,61	0,40	0,50
3,00	0,61	0,66	0,61	0,51	0,71	0,40	0,58
Prom	0,48	0,44	0,50	0,44	0,50	0,32	
Suelo 3							
0,00	0,13	0,10	0,12	0,10	0,15	0,10	0,12
0,00	0,50	0,67	0,58	0,68	0,77	0,10	0,55
1,50	0,64	0,70	0,72	0,82	0,94	0,71	0,76
2,25	0,82	0,85	0,86	0,82	0,80	0,80	0,83
3,00	1,00	0,83	0,82	0,67	1,08	1,09	0,92
Prom	0,62	0,63	0,62	0,62	0,75	0,66	

Cuadro 6. Concentración de potasio (%) en tejidos foliares, en relación a los tratamientos de cal y fósforo.

Grado de neutralización de aluminio	Dosis de aplicación de fósforo,						Prom.
	0,00	0,75	1,50	2,25	3,00	3,25	
Suelo 1							
0,00	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3
0,75	2,5	2,2	2,4	2,4	2,4	2,1	2,3
1,50	2,0	1,5	1,6	1,6	1,5	1,2	1,6
2,25	2,1	2,0	1,8	1,2	1,5	1,1	1,6
3,00	1,6	1,7	1,0	0,5	1,1	1,0	1,2
Prom	1,7	1,5	1,4	1,2	1,4	1,2	
Suelo 2							
0,00	0,8	1,2	1,2	2,1	1,5	1,6	1,4
0,75	2,1	2,3	2,6	2,5	1,9	2,0	2,2
1,50	1,8	1,7	1,8	1,9	1,9	1,6	1,8
2,25	1,8	2,7	1,6	1,6	2,0	2,0	2,0
3,00	1,4	2,6	2,2	1,6	1,4	2,0	1,9
Prom	1,6	2,1	1,9	1,9	1,7	1,8	
Suelo 3							
0,00	1,4	0,3	0,4	0,3	0,5	1,6	0,8
0,75	3,0	1,9	1,6	2,4	1,2	2,0	2,0
1,50	1,1	1,6	1,1	0,9	0,8	1,6	1,2
2,25	1,4	1,2	0,9	0,8	0,5	1,6	1,1
3,00	0,8	1,7	0,6	0,9	0,6	1,5	1,0
Prom	1,5	1,3	0,9	1,1	1,7	1,7	

Cuadro 7. Concentración de magnesio (%) en tejidos foliares, en relación a los tratamientos de cal y fósforo.

Grado de neutralización de aluminio	Dosis de aplicación de fósforo $\mu\text{g/ml}$						Prom.
	0,00	0,75	1,50	2,25	3,00	3,75	
Suelo 1							
0,00	0,06	0,04	0,08	0,06	0,06	0,08	0,06
0,75	0,09	0,04	0,04	0,04	0,04	0,19	0,07
1,50	0,20	0,23	0,09	0,17	0,09	0,32	0,18
2,25	0,22	0,18	0,25	0,36	0,29	0,40	0,28
3,00	0,16	0,15	0,18	0,15	0,28	0,44	0,22
Prom	0,15	0,13	0,12	0,16	0,15	0,29	
Suelo 2							
0,00	0,18	0,17	0,16	0,21	0,20	0,30	0,20
0,75	0,23	0,18	0,21	0,20	0,25	0,26	0,22
1,50	0,18	0,17	0,30	0,22	0,15	0,28	0,20
2,25	0,22	0,20	0,26	0,25	0,27	0,22	0,24
3,00	0,18	0,21	0,24	0,25	0,31	0,28	0,25
Prom	0,20	0,19	0,22	0,23	0,23	0,27	
Suelo 3							
0,00	0,06	0,04	0,06	0,04	0,08	0,09	0,06
0,75	0,14	0,14	0,14	0,21	0,15	0,12	0,15
1,50	0,15	0,18	0,20	0,28	0,30	0,16	0,21
2,25	0,18	0,20	0,22	0,26	0,24	0,17	0,21
3,00	0,24	0,16	0,23	0,11	0,28	0,16	0,20
Prom	0,15	0,14	0,17	0,18	0,21	0,14	

El encalado provocó un aumento en el pH, en el contenido de calcio y en la utilización del fósforo por las plantas; causó una fuerte disminución del aluminio intercambiable, potasio, magnesio, hierro y manganeso.

Los mejores resultados en cuanto a producción de materia seca se obtuvieron con la neutralización de 1,50 y 2,25 veces la cantidad de aluminio intercambiable para los suelos 2 y 3, y de 3 veces para el suelo 1; y con las cantidades más altas de fósforo aplicadas, a saber: 3,00 y 3,75 veces la capacidad de fijación de este elemento.

Se concluyó que la infertilidad de estos suelos puede estar relacionada no sólo con la deficiencia

de calcio como nutrimento y la toxicidad provocada por altos contenidos de aluminio intercambiable, sino también con cantidades originalmente bajas de fósforo en los suelos.

#### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al personal del Laboratorio de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería, y en especial al Ing. Agr. Raymundo Amerling por su colaboración en los análisis de las muestras de suelos y plantas. Al Ing. Agr. Alfredo Alvarado, M. Sc., por su valiosa ayuda en la clasificación de los suelos.

## LITERATURA CITADA

1. AYRES, A. S. Liming Hawaiian sugar cane soils, *Hawaiian Planters Record* 56 (3): 224-227. 1961.
2. BERNARDETH, M., CABALA, E. P. e ILTON, F. Efeitos da incorporacao de doses crescentes de calcario em alguns solos da regio cauceira da Bahia. *Revista Theobroma* 1 (2); 17-28. 1971.
3. BORNEMISZA, E., LAROCHE, F. A. y FASSBENDER, H. W. Effects of liming on some chemical characteristics of a Costa Rica latosol. *Florida Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 27: 219-226. 1967.
4. BORNEMISZA, E., La solución extractora y la humedad en relación con el potasio intercambiable. Experiencia en un suelo aluvial de Costa Rica. *Turrialba* 10 (1): 35-39. 1960.
5. BOUYOUCOS, G. J. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agronomy Journal* 54: 464-465. 1962.
6. BRAGA, J. M., BRAGA, L. J. y FONTES, L. A. N. Efeito da aplicacao de calcario sobre niveis de pH, cálcio, magnésio, fósforo e potássio do solo. *Revista Ceres (Brasil)* 18 (98): 279-293. 1971.
7. DE KOCK, P. C. The physiological significance of the potassium-calcium relationship in plant growth. *Outlook on Agriculture* 4 (2): 93-98. 1964.
8. FASSBENDER, H. Efecto del encalado en la mejor utilización de fertilizantes fosfatados en un andosol de Costa Rica. *Fitotecnia Latinoamericana* 6 (1): 115-126. 1969.
9. FASSBENDER, H. y ROLDAN, J. A. Formas y equilibrios de Mn en suelos de América Central. *Turrialba* 23 (1): 30-36. 1973.
10. FOX, R. L., de DATTA, S. K. y SHERMAN, G. D. phosphrous solubility and availability to plants and the aluminum status of Hawaiian soils as influenced by liming. *Transactions. Joint Meeting Commissions IV an V. International Society of Soil Science. New Zealand. pp. 574-583. 1962.*
11. FOX, R. L. y PLUCKETT, D. L. Overliming Hawaiian soils creates problems. *Hawaii Farm Science* 13 (3): 9-10. 1964.
12. FRIED, M. y DEAN, L. A. Phosphate retention by iron and aluminum in cation exchange systems. *Soil Science Society of America Proceedings* 19 (2): 143-147. 1955.
13. HORTENSTINE, C. C. y OZAKI, H. Y. The effects of liming on the availability of Fe and Mn and on soil Ca and pH on Davie fine sand. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 21: 44-50. 1962.
14. HSU, H. P. Adsorption of phosphate by aluminum and iron in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 28: 474-478. 1964.
15. HUNTER, A. H. Métodos de análisis y de invernaderos. Departamento de Suelos, Universidad de Carolina del Norte. Raleigh. Mimeografiado. 30 p. 1970.
16. KAMPRATH, E. J. Exchangeable aluminium as criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 34: 252-254. 1970.
17. LAROCHE, F. A. Efeitos da calagem sobre o complexo de troca de un latosolo tropical e os teores de cations absorbido pelo tomate. Tesis de grado M. Sc. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Turrialba, Costa Rica. 76 p. 1966.
18. LIN, C. y COLEMAN, N. T. The measure of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Science Society of America Proceedings* 24: 444-446. 1960.
19. MIKKELSEN, D. S., de FREITAS, L. M. M. y Mc LUNG, A. C. Effects of liming and fertilizing on cotton, corn, soybeans on Campo Cerrado Soils. State of Sao Paulo, Brasil. IRI Research Institute Incorporation. *Bulletin* 26. 34 p. 1963.
20. MIRANDA, F. Porqué necesitamos aplicar cal en los suelos ácidos? *Agricultura al Día* 13 (11-12): 6,30 y 40. 1967.
21. PIÑERES, E. Efecto del encalado sobre el pH, las bases cambiables y el aluminio extraído en seis suelos de Costa Rica. Tesis de licenciatura en Química. Departamento de Química. Universidad de Costa Rica. 33 p. 1969.
22. SAIZ DEL RIO, J. F. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos: métodos de laboratorio para diagnosis de fertilidad. Departamento de Energía Nuclear Centro Tropical de Investigación y Enseñanza. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 107 p. 1962.
23. SCHALSCHA, E., NIETO, C. y BINHAM, F. Algunas características de la fijación de fosfatos en suelos alofánicos de Chile. *Agricultura Técnica* 33: 81-86. 1973.
24. SEATZ, L. F. y JURINAK, J. J. Lime and soil fertility. *Soil. United States Department of Agriculture. Yearbook. pp. 115-121. 1957.*

25. SERPA, R. y GONZALEZ, M. A. Estudio de la necesidad de cal en tres suelos ácidos de Costa Rica. Resúmenes. II Congreso Agronómico Nacional. Colegio de Ingenieros Agrónomos, San José, Costa Rica. 22 al 27 de febrero. pp. 51-52. 1976.
26. SHAW, W. M. Reaction of calcium carbonate with soils and determination of their calcium capacities. *Journal of the Association of Official Agricultural Chemists* 36: 421-441. 1953.
27. SHERMAN, G. D. Manganese and soil fertility. *Soil. United States Department of Agriculture. Yearbook.* pp. 135-138. 1957.
28. SHERMAN, G. D. y CHU, A. C. Differential fixation phosphate by typical soils of Hawaiian Great Groups of Soils. *Hawaii University Agriculture Experiment Station. Technical Bulletin* 16. 20 p. 1952.