

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA
DEPARTAMENTO DE CULTIVOS Y SUELOS TROPICALES

EFFECTO DEL ENCALADO SOBRE LAS CARGAS ELECTRICAS
Y OTRAS PROPIEDADES DE TRES SUELOS DE COSTA RICA

TESIS SOMETIDA A LA CONSIDERACION DE LA COMISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DEL PROGRAMA CONJUNTO UCR — CATIE PARA OPTAR AL GRADO DE

Magister Scientiae

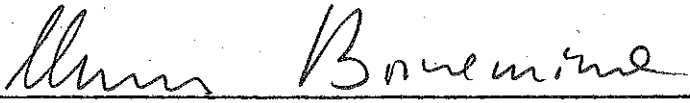
ARESQUE MACHADO DE ALMEIDA


Turrialba, Costa Rica


1977


Esta tesis ha sido aceptada en su forma presente por la
Comisión de Estudios de Posgrado del Programa Conjunto
UCR-CATIE, como requisito parcial para optar al grado de


Magister Scientiae

JURADO:  Consejero
Elemer Bornemisza, Ph.D.

 Comité
Rufo Bazán, Ph.D.

 Comité
José Fargas, Ph.D.

 Comité
Alfredo Alvarado, M.S.


Coordinador
Sistema de Estudios de Posgrado
de la Universidad de Costa Rica

DEDICATORIA

En homenagen póstuma

A mi padre

A mi hija Luciana

A María Augusta, mi esposa

con cariño

A Herminia, mi madre

A Julita, mi suegra

con mucho afecto

A mis hermanos, sobrinos y

cuñados

A Masoneria Universal

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Elemer Bornemisza, Consejero Principal, por su entusiasmo, sugerencias y orientación invaluable, en el desarrollo del presente trabajo.

A los Doctores Rufo Bazán, José Fargas e Ing. Alfredo Alvarado, miembros del Comité Consejero, por sus sugerencias y observaciones en el manuscrito.

A los Doctores Pedro Oñoro, Carlos Burgos y Gustavo Cubillos, por su interés y ayuda apreciable en las diversas fases del trabajo.

A todos los profesores y compañeros de estudios del Programa Conjunto UCR-CATIE, es especial al compañero peruano Salvador Flores Paitán, de quienes siempre recibí estima y consideración.

A la Universidad Federal de Paraíba, la Organización de los Estados Americanos (OEA) y a la Dirección General del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA (IICA), por haber hecho posible mis estudios.

Al personal de la Unidad de Estadística y Computación del IICA, por su ayuda en el procesamiento estadístico de los datos.

A todo el personal del Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales del CATIE, en particular a los señores Eduardo Tencio, Arturo Coto y Alfredo Eicado.

A todas las personas que en una u otra forma colaboraron en la realización del presente trabajo de tesis.

BIOGRAFIA

El autor nació en la ciudad de Icó, Estado del Ceará, Brasil.

Realizó sus estudios universitarios en la Escola de Agronomía do Nordeste de la Universidade Federal de la Paraíba en la ciudad de Areia, graduándose como Ingeniero Agrónomo en diciembre de 1968.

De 1969 a 1971 trabajó como Profesor Asistente de Química Orgánica y Bioquímica de la Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Estado del Río Grande del Norte, del Ministerio de Educação e Cultura.

En 1972 ingresó a la Escola de Agronomía da Universidade Federal da Paraíba y a la Faculdade de Química de la Fundação Universidade Regional del Nordeste, como Profesor Adjunto de Química Analítica.

Durante los años de 1972 y 1973 fue invitado para dar el curso de Suelos en la Escola de Agronomía y Veterinaria de Patos, Estado da Paraíba.

En marzo de 1975 ingresó al Programa Conjunto Universidad de Costa Rica-Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (UCR-CATIE), donde realizó estudios en la especialidad de Química de Suelos, y recibió el grado de *Magister Scientiae* en febrero de 1977.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Concepto de acidez del suelo	3
2.2 Bases físico-químicas de cargas y CIC del suelo ..	5
2.3 Encalado de los suelos	11
2.4 Requerimiento de cal	14
2.5 Influencia del encalado sobre la toxicidad del aluminio y manganeso	15
2.6 Fijación de fósforo por el suelo	19
2.7 El encalado y la disponibilidad de fósforo	22
2.8 Respuesta de los cultivos al encalado	24
2.8.1 Influencia del encalado en el aumento en rendimiento	24
2.8.2 Efecto detrimental del sobreencalado	29
2.9 Influencia del encalado en el crecimiento de las raíces	31
2.10 Influencia del encalado sobre los micro- organismos del suelo	35
2.11 Efecto del encalado sobre las propiedades físicas.	37
2.12 Efecto residual de la cal	39
3. MATERIALES Y METODOS	41
3.1 Localización	41
3.2 Suelos	41
3.3 Aplicación del encalado e incubación	42
3.4 Estudio de invernadero	44
3.5 Diseño experimental y tratamiento	47
3.6 Determinaciones de laboratorio	47
3.6.1 Requerimiento de cal	48
3.6.2 Punto de carga cero (ZPC)	48
3.6.3 Cargas eléctricas del suelo	49
3.6.4 Reacción del suelo (pH)	49
3.6.5 Materia orgánica	49
3.6.6 Bases cambiables	49
3.6.7 Capacidad de intercambio catiónico (CIC) ..	50
3.6.8 Análisis de los tejidos vegetales	50
3.7 Análisis estadístico	50

4.	RESULTADOS Y DISCUSION	52
	4.1 Efecto del encalado	52
	4.1.1 Efecto sobre algunas propiedades químicas de los suelos	52
	4.1.1.1 Efecto en el pH	52
	4,1.1.2 Efecto en la acidez intercambiable	56
	4.1.2 Efecto en el punto de carga cero (ZPC)	59
	4.1.3 Efecto en las cargas eléctricas del suelo ..	64
	4.1.4 Efecto en la absorción de nutrimentos	66
	4.1.4.1 Efecto en la absorción de fósforo	66
	4.1.5 Efecto en la producción de materia seca	70
5.	CONCLUSIONES	81
6.	RESUMEN	83
6a.	SUMMARY	85
7.	LITERATURA CITADA	87
8.	APENDICE	99

LISTA DE CUADROS

TEXTO

<u>Cuadro N°</u>		<u>Página</u>
1	Características químicas de los suelos antes del encalado	43
2	Cantidad de Ca en meq/100 g de suelo, correspondiente a los diferentes tratamientos	44
3	Cantidad de nutrimentos aplicados y fuente utilizada, para los estudios de invernadero, según Laroche (78)	45

APENDICE

1	Registro de los valores de pH obtenidos por la curva de titulación, según método de Abruña y Chandler	100
2	Valores de pH de los suelos en las dos épocas de muestreo	101
3	Valores de la acidez intercambiable de los suelos en las dos épocas de muestreo	102
4	Ecuaciones de regresión y valores de "R" entre el encalado con el pH y acidez intercambiable ...	103
5	Resultado de los contrastes realizados para observar la influencia del encalado en el pH del suelo	104
6	Cuadrados medios de los análisis de varianza del pH y de la acidez intercambiable del suelo	105
7	Resultado de los contrastes realizados para observar la influencia del encalado en la acidez intercambiable	106
8	pH del suelo en diferentes concentraciones de NaCl y con diferentes adiciones de HCl o NaOH, suelo Colorado	107
9	pH del suelo en diferentes concentraciones de NaCl y con diferentes adiciones de HCl o NaOH, suelo Instituto	108
10	pH del suelo en diferentes concentraciones de NaCl y con diferentes adiciones de HCl o NaOH, suelo Paraíso	109

<u>Cuadro N°</u>		<u>Página</u>
11	Adsorción de Na^+ y Cl^- , y cargas netas de los suelos	110
12	Adsorción de Ca^{2+} y Cl^- , y cargas netas de los suelos	111
13	Adsorción de Mg^{2+} y $\text{SO}_4^{=}$, y cargas netas de los suelos	112
14	Concentración de fósforo absorbido (%) por las plantas de sorgo, correspondiente a los tres cortes y el total	113
15	Ecuaciones de regresión y valores de "R" entre el encalado con la absorción de fósforo por las plantas	114
16	Cuadrados medios de los análisis de varianza de la absorción de fósforo por las plantas	115
17	Resultados de los contrastes para observar la influencia del encalado en la absorción de fósforo por las plantas	116
18	Cantidad de biomasa expresado en materia seca (g/maceta) de sorgo, correspondientes a los tres cortes y el total	117
19	Ecuaciones de regresión y valores de "R" entre el encalado con la producción de materia seca ...	118
20	Resultado de los contrastes realizados pra observar la influencia del encalado en la producción de materia seca	119
21	Cuadrados medios de los análisis de varianza de la producción de materia seca, en los tres cortes	120
22	Acidez, contenido de cationes y CIC obtenidos con diferentes encalados. Antes de la siembra del sorgo y después del período de incubación con cal	121
23	Acidez, contenido de cationes y CIC obtenidos con diferentes encalados. Datos para después del último corte del cultivo de sorgo	122
24	Biomasa del sorgo y su contenido mineral, primer corte (después de un abonamiento nitrogenado) ...	123

<u>Cuadro N°</u>		<u>Página</u>
25	Biomasa del sorgo y su contenido mineral, segundo corte (después del abonamiento completo)	124
26	Biomasa del sorgo y su contenido mineral, tercer corte	125
27	Reacción del suelo (pH), correspondiente a las etapas del experimento	126

LISTA DE FIGURAS

TEXTO

<u>Figura N°</u>		<u>Página</u>
1	Influencia de encalado en la reacción del suelo (pH), correspondiente a los dos muestreos	53
2	Influencia del encalado en la acidez intercambiable del suelo, correspondiente a los dos muestreos	57
3	Curva de titulación potenciométrica en diferentes concentraciones de NaCl y determinación del ZPC, suelo Colorado	60
4	Curva de titulación potenciométrica en diferentes concentraciones de NaCl y determinación del ZPC, suelo Instituto	61
5	Curva de titulación potenciométrica en diferentes concentraciones de NaCl y determinación del ZPC, suelo Paraíso	62
6	Influencia del encalado en la absorción de fósforo por las plantas, correspondiente a los tres cortes	67
7	Influencia del encalado en la absorción de fósforo por las plantas, correspondiente a la suma de los tres cortes del cultivo	68
8	Relaciones entre la producción de materia seca (70°C) de varios cortes del cultivo de sorgo y las tasas de caliza en el suelo Colorado	72
9	Relaciones entre la producción de materia seca (70°C) de varios cortes del cultivo de sorgo y las tasas de caliza en el suelo Instituto	73
10	Relaciones entre la producción de materia seca (70°C) de varios cortes del cultivo de sorgo y las tasas de caliza en el suelo Paraíso	74
11	Influencia de encalado en la producción de materia seca, correspondiente a los tres cortes del cultivo	75
12	Influencia del encalado en la producción de materia seca, correspondiente a la suma de los tres cortes del cultivo	76

APENDICE

<u>Figura N°</u>		<u>Página</u>
1	Curva de requerimiento de cal, método de Abruña y Vicente-Chandler	100

1. INTRODUCCION

Se conoce que la acidez del suelo constituye uno de los problemas más importantes para la agricultura de vastas zonas tropicales y subtropicales.

Algunos de los suelos de regiones tropicales húmedas y calientes, se caracterizan por su elevada acidez y desequilibrio catiónico como consecuencia de un estado avanzado de meteorización y lixiviación de bases. Estos procesos favorecen la formación de óxidos hidratados amorfos (18), los cuales poseen propiedades notoriamente distintas de los coloides cristalinos más comunes en las regiones templadas (88) y otras zonas tropicales (136, 137).

Una diferencia significativa entre los suelos de regiones tropicales y los suelos comunes en regiones templadas reside en que muchos de estos últimos se caracterizan por un sistema coloidal dominante con densidad de cargas constantes y permanentes, mientras que en gran variedad de suelos tropicales son dominantes las cargas dependientes del pH del suelo (122, 136, 137).

Como estas cargas determinan el intercambio de iones en los suelos su conocimiento es importante al influir sobre los cationes en el complejo de cambio. Además, se debe conocer la magnitud y signo de estas cargas para encalado y manejo del suelo como se han señalado en varios trabajos recientes (71, 76, 136, 137).

El encalado es una de las prácticas agrícolas más antiguas (42) y más utilizadas en las zonas templadas; en los suelos de las regiones tropicales su uso, además de ser restringido, ha sido un aspecto menos estudiado y presenta actualmente ciertas interrogativas. Hace falta más informaciones sobre cuáles son los cultivos tropicales que necesitan encalado y qué cantidad

de enmienda es requerida en diferentes condiciones.

En varios trabajos se propone que el encalado de algunos suelos de los trópicos podría ser llevado a cabo con el objeto específico de aplicar las cantidades mínimas requeridas para reducir el Al intercambiable. De este modo, se cree que reduciría la posibilidad detrimental del encalado. Así, los muchos beneficios derivados del encalado adecuado resultaría en un aumento en el rendimiento de los cultivos.

En el presente trabajo se trató de incorporar algunos puntos de vista nuevos para estudiar las influencias del encalado en los suelos, en tres suelos superficiales de la vertiente Atlántica de Costa Rica: las series Colorado, Instituto y Paraíso.

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

1. Determinar las necesidades de cal, usando los métodos de la curva de titulación y acidez intercambiable y comprobarlo en condiciones de invernadero para tres suelos.
2. Determinar el punto de carga cero (ZPC) y las cargas eléctricas del suelo, y sus relaciones con el encalado.
3. Evaluar la influencia del encalado en el pH, acidez intercambiable, ZPC, cargas eléctricas, producción de materia seca y absorción de nutrimentos por las plantas.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Concepto de acidez del suelo

Las ideas anteriores, difundidas universalmente por Bradfield (16), consideraban que los suelos ácidos serían aquellos cuyo complejo de cambio se encuentra saturado en un grado mayor o menor con iones hidrógeno. De esta manera, la medición de pH del suelo representaba el grado de disociación de estos iones hidrógeno. Las investigaciones parecían indicar que las arcillas y el complejo orgánico de los suelos forman un grupo algo particular de ácidos débiles cuyas cargas negativas son neutralizadas por iones hidrógenos y por cationes de cambio como potasio, calcio, magnesio, y otros.

Esta teoría se comprobaba experimentalmente por preparación de suelos y arcillas ácidas por electrodiálisis y obtenían curvas de titulación potenciométrica que servían para caracterizar el comportamiento de los suelos. Los coloides así obtenidos se creían saturados de iones hidrógenos y se comportaban como ácidos débiles.

Posteriormente, Coleman y Harvard (27) y Low (81), usando la misma técnica, encontraron que los cambiadores de iones sintéticos saturados de hidrógenos se comportaban como ácidos fuertes, y que aquellos saturados con aluminio eran en efecto los que se comportaban como ácidos débiles y que en los suelos acidulados por electrodiálisis el aluminio era dominante.

En varios trabajos, Paver y Marshall (107), Schofield (122) y Mukherjee et al. (103), demostraron definitivamente que en adición al hidrógeno, el aluminio y el hierro contribuían en gran parte en la acidificación del suelo.

Más tarde, Coleman y colaboradores (29, 31), Jenny (70), Jackson (68)

y McLean y colaboradores (95, 96), demostraron que es el aluminio y no el hidrógeno, en los suelos ácidos inorgánicos, el catión predominante.

Actualmente se ha establecido que el aluminio es absorbido por las arcillas no solamente como el ion cambiante monomérico trivalente, sino también como polímeros de hidróxido de aluminio de tamaño y grado de hidroxilación variable (31) y que el ion aluminio hexahidratado se ioniza en solución acuosa similarmente a un ácido débil (123) produciendo gran parte de los iones de hidrógeno que contribuyen al pH del suelo medido en agua.

Concluyendo, se define reacción del suelo (pH) como la habilidad del suelo para producir iones $(H_3O)^+$ por hidrólisis; resultante de acción o interacción de varios componentes denominados como componentes de la acidez del suelo (44). Estos componentes pueden ser resumidos en (31, 68, 70):

- a) iones hidroxonios $(H_3O)^+$, adsorbidos a las partículas coloidales;
- b) iones monoméricos de aluminio $Al(H_2O)_6^{3+}$ y/o $[(AlH_2O)_5(OH)]^{2+}$ y/o $[Al(H_2O)_4(OH)_2]^+$, también adsorbidos a las partículas coloidales;
- c) iones polímero de aluminio $[Al_m(H_2O)_n(OH)_p]^{(3m-p)+}$ asociados a diversos componentes del suelo;
- d) los hidrógenos de los grupos carboxílicos y fenólicos del material orgánico del suelo.

Los iones $(H_3O)^+$ y las formas monoméricas de aluminio adsorbido, se evidencian como los iones más activos de la acidez de muchos suelos y se encuentran a pH muy bajos entre 4,0 y 5,2 (25).

Según McLean et al. (95) la actividad de las formas de acidez se

puede presentar en el siguiente orden: cargas permanentes H^+ > cargas permanentes Al^{3+} > hidróxidos Al-monómeros > hidróxidos Al-polímero \cong acidez de la materia orgánica \cong acidez $-AlOH$ o $-SiOH$.

Para las condiciones de trópicos Evan y Kamprath (39) y McCart y Kamprath (92) y Popenoe (111), consideran que el aluminio intercambiable o el Al monomérico es el componente más importante de la acidez de estos suelos.

2.2 Bases físico-químicas de cargas y CIC del suelo

Los coloides del suelo pueden ser clasificados en general en dos categorías, aquellos en los cuales la densidad de carga superficial y, por consiguiente, la capacidad de intercambio de cationes, tienen valores constantes y permanentes, y aquellos cuya densidad de carga superficial y el signo de ella dependen del pH (76, 132, 136, 137).

Las cargas constantes o permanentes son generalmente atribuidas a los minerales arcillosos cristalinos, con cargas originadas en la sustitución isomórfica dentro de la estructura de arcilla que resulten en cargas negativas permanentes. Este es el caso típico de los minerales esmectitas, vermiculitas, ilitas y cloritas, dominantes en los suelos inorgánicos de las regiones de clima templado (87).

Las cargas dependiente del pH en la fracción inorgánica de suelo son debidas a la gran cantidad de óxidos y hidróxidos amorfos de Fe, Al y Si; la superficie de estos minerales contiene iones no completamente coordinados y por este la superficie está cargada eléctricamente (106). Estos tipos de minerales son principalmente identificados en los Aridisoles, Ultisoles, Oxisoles Inceptisoles (Andepts) y Histosoles de los trópicos (38, 132, 136, 137).

Además de los óxidos amorfos de hierro y aluminio, otros materiales pueden comportarse de forma similar, y el mecanismo de formación de cargas sería semejante (caolinita, haloisita, alófana y otros materiales amorfos). Para la materia orgánica, se considera la formación de cargas negativas por la disociación de grupos carboxílicos y otros, y la formación de cargas positivas, probablemente de menor importancia, por la adsorción de protones de grupos aminos (106).

Velasco de Pedro y Martínez (137) mencionan que las arcillas están caracterizadas principalmente por cargas permanentes, mientras los compuestos húmicos aportan sobretodo cargas variables al suelo.

Para Duchaufour (34) las cargas permanentes son las que equilibran los cationes básicos cambiabiles, así como también los iones responsables de la acidez que son cambiabiles al pH del suelo. Por lo tanto, las cargas positivas superficiales serían resultado de la adsorción de un protón, y las cargas negativas se formarían por la disociación de los grupos hidróxilos de la superficie.

Jackson (69) demostró que los iones complejos hidratados de aluminio $Al(OH)^{++}$ y $Al(OH)_2^+$ de ciertas arcillas que no son cambiabiles al pH del suelo, liberan cargas negativas a medida que se eleva el pH de la solución extractante.

Duchaufour (34) señala que cuando las cargas permanentes predomina, el pH indica con bastante seguridad el grado de saturación de bases. Lo mismo no ocurre cuando dominan las cargas variables o dependientes del pH, en este caso, la saturación de bases medido a pH 7,0 es más elevado con relación a su valor real. Por lo tanto, el pH refleja el grado de saturación medido a pH 7,0, una condición artificial.

La capacidad de intercambio catiónico medida al pH del medio edáfico puede diferir de la capacidad de intercambio medida a pH constante y está sujeta a fluctuaciones considerables, pero cuantifica en un momento dado la totalidad de cationes susceptible de ser retenidos.

Varios investigadores (37, 38, 132, 137) reportan que cuando dominan las cargas variables o dependientes de pH, la CIC medida a pH 7,0 es más elevada que su valor real. Por esto, las determinaciones rutinarias de CIC deben ser adecuadas para medir retenciones de iones de suelos que poseen cargas variables.

Para van Raij y Peech (137) y Sumner (131), los métodos estándar para determinar la CIC no representa la condición del suelo con cargas variables por dos razones: primero, la medición es usualmente llevada a cabo a un valor arbitrario de pH que no se relaciona con el valor natural de pH encontrado en condiciones de campo; segundo, el uso de alcohol o agua para remover el exceso del electrolito saturante, que también es común en los métodos, causa un desprendimiento de cationes, falsificando así los datos.

Schachtschabel y Renge, citados por Velasco de Pedro y Martínez (138) comprobaron que la variación del grado de saturación en bases se debía principalmente al humus, al estudiar separadamente la materia orgánica y las arcillas. Estos autores observaron que ambos a pH 8,0 tenían un valor de saturación de bases próximo de 100 por ciento, pero a pH 4,0 el grado de saturación de la fracción mineral era de 45 por ciento, mientras que para la fracción orgánica se suponía solamente 25 por ciento. De ahí dedujeron que en la materia orgánica existen cargas variables, por lo que el grado de saturación descendía considerablemente.

Estudiando los suelos de la sierra de Guadarama, España, Velasco

de Pedro y Martínez (138) observaron que la mayor parte de la CIC proviene de la materia orgánica del suelo. Estos autores afirman que la fracción principal de cargas permanentes y variables son aportadas al suelo por la fracción orgánica, mientras que dentro de la fracción mineral predominan las cargas permanentes sobre las variables.

Sawhney y Norrich (121) y Sawhney, Frink y Hill (120) señalan que los componentes irreversibles de CIC dependiente del pH, atribuidos al Fe y Al de intercapas son de muy pequeña magnitud en algunos suelos de regiones tropicales y de las regiones templadas, y que la materia orgánica constituye el componente de carga dependiente de pH en suelos de regiones templadas. Estos autores reportan que la caolinita, haloisita, imogolita y alófana cuando están presentes pueden contribuir significativamente para los componentes de CIC dependiente del pH.

Espinoza et al. (38) muestran que los andepts tienen una mezcla compleja de cargas dependientes del pH y permanentes en la superficie. Estos autores encontraron que el máximo de cargas dependiente del pH está en el rango de 15 a 20 meq/100 g de suelo; mientras que las cargas negativas permanentes estaban en el rango de 45 meq/100 g de suelo. Estos resultados provienen de la sustitución de los iones de las capas libres de los óxidos e hidróxidos de Al, Fe y Si amorfos, más bien que los minerales de arcilla del tipo 2:1.

Según Keng y Uehara (76) la electroquímica de Oxisoles y Ultisoles de los trópicos es más adecuadamente descritas por la ecuación modificada de Guy-Chapman:

$$\sigma_o = \frac{KE}{4} \cdot \frac{RT}{F} \ln \frac{H^+}{H_o^+} = \frac{KE}{4} (0,059) (ZPC - pH)$$

en la cual σ_o es la densidad de carga, K es la concentración de la solución

del suelo, ϵ es la constante dieléctrica del medio, R es la constante de los gases, T es la temperatura absoluta, F es la constante de Faraday y H^+ es la concentración del ion hidrógeno.

De acuerdo con esta ecuación, tres situaciones posibles en los suelos son fácilmente explicadas. El primer caso envuelve el caso $H^+ = H^+$ o (ZPC = pH). Esto ocurre cuando $O_o = 0$, y se puede evidenciar en muchos Oxisoles y Ultisoles de textura fina y algunos Alfisoles de baja capacidad de intercambio catiónico. La segunda situación se encuentra cuando en el suelo $H^+ > H^+$ o (ZPC > pH). En esta situación la carga superficial es positiva y el suelo será intercambiador de aniones. La última situación envuelve el caso $H^+ < H^+$ o (ZPC < pH). Esto es normalmente el caso de muchos suelos superficiales. En esta situación el suelo posee cargas negativas y el pH en KCl N será más ácido que el pH en agua.

Uehara y Keng (136) mencionan que un parámetro conveniente en relación con el manejo de suelos que tienen minerales con cargas dependientes del pH es el punto de carga cero (ZPC). La diferencia entre los valores de pH medidos en KCl N y en agua puede ser negativa, cero o positiva, correspondiente al signo de la carga neta del coloide.

$$\Delta \text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$$

Cuando en algunos suelos el pH medido en agua y en KCl N dan el mismo valor que el correspondiente con el ZPC, tales suelos tendrán baja afinidad por iones monovalentes como NH_4^+ o Cl^- y pérdidas de abonos por lavado puede ser explicada por estas condiciones. Para valores de pH superiores al correspondiente al ZPC, el suelo tendrá cargas negativas netas (intercambiador de cationes) y el pH en KCl N será más bajo que el pH en agua. Cuando el suelo es un intercambiador de aniones su pH en KCl N es

más alto que en agua.

Se puede determinar el ZPC por el método descrito por van Raij y Peech (137).

Según Uehara y Keng (136) el método descrito por los autores antes mencionados (137), para determinar la carga neta en coloides del suelo se recomienda para suelos que contienen cantidades apreciables de minerales con cargas dependiente del pH. Este método consiste básicamente en la determinación de adsorción de ambos iones positivos y negativos de las soluciones de NaCl, CaCl₂ o MgSO₄ en función de la concentración del electrolito y pH de la suspensión.

En base a este principio van Raij y Peech (137) sugieren que la determinación de cargas podría ser realizada suspendiendo el suelo con una solución de CaCl₂ 0,01 N y sin remoción del exceso de sal por lavado. Tal procedimiento sería teóricamente acertado y reflejaría más adecuadamente el desarrollo de cargas y la capacidad de intercambio de cationes y de aniones del suelo bajo condiciones de campo.

El-Swaify y Sayegh (37), Sumner y Davidzt (132) y van Raij y Peech (137) observaron que disminuyendo la concentración del electrolito saturante disminuía la magnitud de las cargas netas del coloide del suelo. También encontraron en todos los suelos estudiados sin excepción que disminuyendo el valor del pH de la suspensión aumentaban las cargas positivas.

Mekaru y Uehara (97) señalan que las variaciones de cargas no son limitadas por el efecto de H⁺ o OH⁻, pero también puede ser causado por adsorción de iones como PO₄, SiO₄, SO₄ y varios aniones orgánicos. Estas adsorciones aniónicas aumentan las cargas negativas del complejo coloidal

desplazando el pH del ZPC a valores más bajos.

Trabajando con Inceptisoles y Oxisoles de Hawai, El-Swaify (36) y El-Swaify y Sayegh (37), encontraron que las cargas asociadas con los constituyentes del suelo, son responsables por muchas propiedades físicas y químicas importantes del mismo. La estabilidad de los agregados del suelo y la subsecuente resistencia a erosión o desestructuración por agentes dispersantes, son afectados por los componentes anfotéricos de suelo.

Para Schofield (122) estas cargas son también de interés cuando se considera el suelo como un almacén de nutrimentos para las plantas, porque la retención de los iones depende directamente del signo y magnitud de las cargas asociadas con los varios constituyentes del suelo.

Según Lyklima, citado por Uehara y Keng (136), la aplicación de cal a los suelos oxídicos, puede resultar en la floculación o dispersión, dependiendo si el encalamiento cambia la carga superficial efectiva de positiva a cero (floculación), o de cero a negativa (dispersión). En general, la cal no dispersa suelos caoliníticos-oxídicos, porque, aunque la cal es efectiva en el desarrollo de cargas superficiales, ella no crea necesariamente cargas efectivas.

2.3 Encalado de los suelos

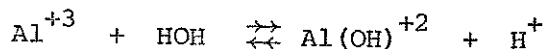
Según los estudios clásicos de Coleman et al. (28), Mehlich y Coleman (98) y Seatz y Peterson (125), se puede resumir los propósitos de encalado de los suelos en:

- a) Suprimir la deficiencia de Ca y Mg;
- b) Corregir los efectos negativos de la acidez.

Para Kamprath (72) la corrección de la acidez, consiste en neutralizar el aluminio intercambiable. Popenoe (111) hace notar que el contenido

de Al intercambiable está muy relacionado con el pH, especialmente en los suelos más ácidos.

Cuando se reemplaza el Al intercambiable de un suelo éste se hidroliza en solución para formar hidróxidos de aluminio y iones H^+ como se indica en la siguiente reacción (72):



Mientras el pH de la solución se aumenta, la hidrólisis continúa con la formación de $Al(OH)_3$ (42).

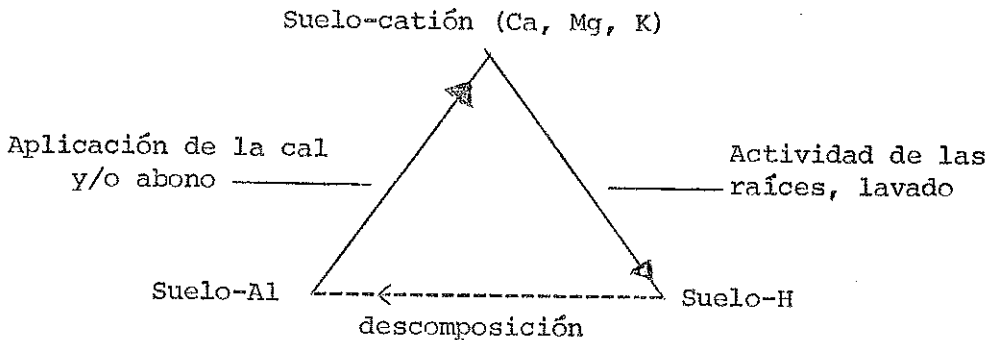
En los lugares en donde se aplica una buena cantidad de fertilizantes es recomendable tener bajo el nivel de Al intercambiable, pues los cationes de las sales de los fertilizantes reemplazarán algo del Al de los sitios de intercambio y aumentarán el Al en la solución del suelo (72).

Woodruff y Kamprath (147) señalan que la razón por la cual se recomienda neutralizar prácticamente todo el Al intercambiable antes de la fertilización, es debido al efecto del Al sobre la cantidad de fósforo requerida para el máximo desarrollo del cultivo. Estos autores observaron que en suelos con alta saturación de Al, el encalado con el propósito de neutralizar el Al, reducía a la mitad la cantidad de fósforo requerido para obtener el máximo desarrollo de plantas.

Los suelos de los trópicos se han vuelto ácidos a través del continuo lavado del perfil por exceso de precipitación que cae anualmente, y uso intensivo de los terrenos con la aplicación de fertilizantes que dejan residuos acidificantes (88).

Bornemisza (18) explica el empobrecimiento de bases, el desarrollo de acidez y la recuperación del suelo como se puede ver en el esquema propuesto por Coleman et al. (31), los cuales pueden representarse como las

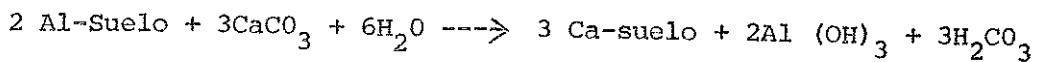
partes de un proceso cíclico a través del cual pasan los componentes coloidales de los suelos.



El ciclo continúa con la descomposición de las arcillas y solubilización de los óxidos hidratados de Al y Fe. Al final se tiene un suelo-Al con acidez elevada cuyos aspectos negativos son (77):

- a) bajo contenido de bases;
- b) alto poder de fijación de fósforo;
- c) deficiencia de Mo por fijación semejante al del P;
- d) concentraciones tóxicas de Al y Mn;
- e) pequeña actividad de microorganismos.

Cuando se añade cal al suelo ácido, el H^+ resultante de la hidrólisis de aluminio, reacciona con el OH^- para formar agua. La neutralización de un suelo ácido con cal puede ser escrita en la forma más sencilla como sigue (72):



Así, el encalado es un agente recuperador eficiente, reemplazando los cationes del complejo de cambio agotado y eliminando los efectos negativos de la acidez.

2.4 Requerimiento de cal

Se han desarrollado muchos procedimientos para medir las necesidades de cal de los suelos ácidos. Se puede definir como la cantidad de cal que se necesita para hacer variar el valor del pH del suelo a otro más adecuado para la planta.

En su casi totalidad, los procesos para determinar el requerimiento de cal en el suelo, envuelven la determinación del hidrógeno intercambiable (H^+) y luego se estima la cantidad de carbonato de calcio ($CaCO_3$) necesario para su neutralización. Existen varios métodos para determinar H-intercambiable; sin embargo, existe variación de los valores que se obtienen según el método que se emplee.

Siguiendo este principio, Brown (23), Woodruff (146), Shoemaker et al. (126) y Pratt (112) emplearon soluciones amortiguadoras para medir la necesidad de cal del suelo.

Por otro lado, Dunn (35), a través de titulación directa usando solución de hidróxido de calcio 0,03N, determina el requerimiento de cal del suelo. Este método presenta una desventaja por el tiempo requerido para el equilibrio entre el suelo y la solución básica añadida. Posteriormente, Abruña y Vicente-Chandler (1), haciendo hervir la suspensión hidróxido-suelo por cinco minutos, modificaron el método tradicional de Dunn (35) haciéndole más práctico y rápido.

McLean et al. (96) verificaron que para suelos con alto contenido de Al-soluble, el método de la solución buffer de Woodruff (146) no estimaba la necesidad real de cal.

Trabajando con suelos de Michigan, Ross et al. (118) encontraron que otros factores son más importantes para indicar el requerimiento de

cal, como por ejemplo la capacidad de intercambio catiónico, contenido de materia orgánica, hidrógeno cambiante y contenido de arcilla.

Igualmente, en suelos de Wisconsin, Keeney y Corey (75) mencionan que el contenido de materia orgánica está significativamente relacionado con el requerimiento de cal y el Al intercambiable no parece ser importante en tal recomendación, en condiciones de sus experimentos.

Sin embargo, en condiciones de los trópicos ácidos, varios autores (28, 39, 73, 96, 134) han demostrado que la variación de la acidez del suelo es principalmente causada por el Al intercambiable, extraíble con solución no tamponada de cloruro de potasio normal (KCl 1N) y pasaron a estimar el requerimiento de cal del suelo basado en la neutralización de éste.

Por otra parte, Amedee y Peech (10, 11) mencionan que algunos suelos ácidos de los trópicos húmedos de Sur América en su mayoría Oxisoles, son conocidos por tener solamente pequeñas cantidades de Al intercambiable. De manera que el requerimiento de cal para dichos suelos, basada en la neutralización de Al intercambiable extraíble con KCl 1N es bajo y es totalmente ambiguo, debido a que las cargas permanentes de la fracción coloidal de estos suelos es baja.

2.5 Influencia del encalado sobre la toxicidad del aluminio y manganeso

La adición de cal al suelo puede tener como objetivo eliminar solamente los iones monómeros de aluminio adsorbidos a Al intercambiable (28, 72), o simplemente a elevar el pH a un valor predeterminado (36, 112, 126).

Cuando la adición de cal tiene la finalidad de elevar el pH a un

valor predeterminado comprendido entre 6,3 y 6,5, medida muy usada para suelos de regiones templadas, la cantidad de cal necesaria es mayor, por que además de los iones Al intercambiables, los otros componentes de acidez son neutralizados en mayor o menor proporción (72, 73).

Kamprath (72) estima que a partir de los valores de pH del suelo de 5,5 y 5,7 ya no hay más Al intercambiable. De manera que, el encalado se fundamenta cuantitativamente que en 1 meq de Al/100 g de suelo exige una ton/ha de cal. Para efecto de recomendación práctica se acostumbra multiplicar los valores indicado por los meq de Al por 1,5 y a 3,0.

Para Oxisoles y Ultisoles de las regiones tropicales, Kamprath (74) señala que el encalado próximo a pH 7,0 puede producir una disminución en el rendimiento de los cultivos en general. Esto concuerda con lo propuesto por Reeve y Sumner (113), de que la principal forma de encalar los Oxisoles de Natal, Africa, es eliminar la toxicidad del aluminio. Estos autores encontraron que la cantidad de cal necesaria para neutralizar el Al intercambiable fue aproximadamente la sexta parte de la cantidad requerida para elevar el pH del suelo a 6,5, ya que para llegar a pH altos mucha cal se ocupa en inducir cargas adicionales, a los cuales hay que neutralizar (136).

Soares et al. (128) confirman el enfoque de encalar los suelos de las regiones tropicales en términos de Al intercambiable. Estos autores reportan que para alcanzar un pH 6,5 en suelos ácidos del Cerrado brasileño, hubo que aplicar cal correspondiente a cuatro veces el Al intercambiable y para reducir la saturación de Al a cero, se aplicó dos veces el Al intercambiable. En esta condición el pH se aproximaba a 5,5. Concluyen que por medio de aplicaciones de 1,5; 2,0 y 4,0 ton/ha de cal, equivalente a 1,5; 2,0 y 3,0 veces el Al intercambiable, se proporciona

condiciones ideales para la mayoría de los cultivos de la región.

Mahilun et al. (84) observaron en suelos de Hawai que el Al intercambiable disminuía con aplicaciones de carbonato o de silicato de calcio. La aplicación de CaSiO_3 produjo una disminución linear del Al intercambiable con el aumento de pH del suelo, mientras que el efecto del CaCO_3 fue curvilinear en las mismas condiciones.

Goedert et al. (54) observaron que el efecto tóxico del Al provoca deficiencia de K, Mg y Ca en el suelo. Mencionan estos autores que el encalado tiene efecto benéfico en la reducción de la toxicidad de Al y también aumenta la capacidad de retención de nutrimentos por el aumento de la capacidad de intercambio catiónico.

Según Foy y Brown (44) el efecto tóxico de Al fue reducido e eliminado por aumento de pH o por adición de fósforo a la solución nutritiva. Concluyen ellos que el efecto benéfico de la adición de fósforo a la solución nutritiva fue asociada con la disminución en solubilidad de Al y el aumento de la cantidad de fósforo soluble en el medio.

Trabajando en Oeste de Africa, Brams (21) menciona que la aplicación de cal después de tres meses cambió el pH de 4,4 a 5,4 y reducía el Al intercambiable de 1,3 a 0,5 meq/100 g de suelo. Diez meses después, el pH fue reducido a 4,5 y el Al intercambiable aumentó a 2,3 meq/100 g de suelo. El señala que en dichos suelos hay una alta reserva de compuestos de Al con rápida tasa de hidrólisis y ocurre también un aumento en ácidos orgánicos durante la mineralización de la materia orgánica en el período de las lluvias.

Semejantemente, como el aluminio, el manganeso cuando se presenta en cantidades excesivas en suelos ácidos puede conducir a toxicidad por

acumulación de manganeso en la forma parcialmente oxidada, llamada fácilmente reducible (Mn_2O_3) (34).

En Oxisoles ácidos de Puerto Rico, Abruña et al. (4) encontraron que el Mn constituye un factor importante en la disminución del rendimiento del tabaco.

En condiciones de invernadero, Dobereiner (32) encontró que la aplicación de 40 ppm de Mn en suelo ácido afecta la nodulación y la fijación de nitrógeno por el frijol común. También observó que en ausencia de toxicidad de Mn la nodulación y la fijación de nitrógeno por el frijol común fue abundante en el suelo con pH 4,4.

Souto y Dobereiner (129), trabajando con varias leguminosas tropicales tales como *Centrosema pubescens*, *Pueraria javanica*, *Glycine javanica*, var. SPI, *Glycine javanica*, var. Tinaroo, *Stylosanthes gracilis* y *Phaseolus atropurpureus*, en suelos del Estado de Río de Janeiro, Brasil, encontraron que el alto nivel de Mn en el suelo causa serios impactos en la nodulación y fijación de nitrógeno por las plantas. En el primer experimento, observaron que *C. pubescens* fue la especie más tolerante al Mn, mientras que *P. javanica*, *G. javanica*, var. Tinaroo y *S. gracilis* mostraron ser las más sensibles. Se observó que la primera dosis de Mn (50 ppm) reducía el peso de nódulos y de nitrógeno fijado. En el segundo experimento, ellos notaron un efecto favorable del encalado en la nodulación y desarrollo de las plantas, pero no en el crecimiento de las raíces.

Trabajando con avena (*Hordeum vulgare* L.), frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y arbejas (*Pisum sativum* L.), en un podzol ácido (pH 4,7), White (150) encontró que la aplicación de encalado reducía los niveles de Mn del tejido de las plantas y del suelo. Los síntomas de toxicidad

de Mn fueron observados en el tejido con niveles de 1000 ppm en el frijol, 550 ppm en la arveja y 200 ppm en la avena. Los niveles de Mn de las plantas fueron bien correlacionados con el pH y el nivel de Mn en el suelo.

En estudios en solución nutritiva con dos variedades de trigo, Atlas 66 (Norte de Carolina) y Monon (Indiana), Foy et al. (45) observaron que Atlas 66 fue más resistente al exceso de Al, pero menos tolerante al exceso de Mn que la Monon. En condiciones de invernadero con suelo tóxico en Al (pH 4,6 a 5,1) el rendimiento de Atlas 66 fue significativamente superior al de Monon; encalando el suelo a pH 5,8 se obtuvieron iguales resultados para ambas variedades. En suelo con exceso de Mn (pH 4,7 a 5,2) la variedad Monon producía rendimiento significativamente superior que Atlas 66. Encalando el suelo a pH 5,9 o 6,9 los rendimientos de ambas variedades no difieren significativamente.

2.6 Fijación de fósforo por el suelo

En general, la fijación de fósforo en los suelos de las regiones tropicales son altas y por esta razón son necesarias altas dosis de fertilizantes que contienen este elemento.

Tisdale y Nelson (133) señalan que los factores que influyen en la fijación de los fosfatos son:

- a) Tipo de material arcilloso, los del tipo 1:1 más activos para adsorber este elemento;
- b) Tiempo de reacción;
- c) Temperatura;
- d) Materia orgánica;
- e) El estado del fósforo en un determinado momento; la relación R_2O_3/P_2O_5 ha demostrado tener también gran importancia.

Varios autores (41, 65, 113, 127) afirman que existe una relación entre la fijación de fósforo y las formas amorfas de Fe y Al, y la fijación de fósforo y complejos organo-metálicos en varios suelos incluyendo los tropicales.

Fassbender y Molina (41) al tratar de determinar la magnitud y factores que intervienen en la fijación de los fosfatos de algunos suelos derivados de cenizas volcánicas de América Central, encontraron correlaciones positivas y altamente significativas entre la fijación de P y los siguientes componentes del suelo: por ciento de arcilla; por ciento de C total; por ciento de Fe y Al. En base a ellos concluyen que a mayor contenido de materia orgánica, arcilla, aluminio y hierro en los suelos, mayor será la fijación de fosfatos y menor será el efecto de los fertilizantes fosfatados.

Adams y Pearson (6) han observado que los fosfatos de Al y Fe formados a bajos valores de pH del suelo, son aparentemente irreversibles y no son disponibles, con un subsecuente incremento del pH del suelo; al mismo tiempo procesos de fijación a altos valores de pH del suelo, que resultan en la formación de compuestos de fosfatos de calcio relativamente insolubles, son aparentemente reversibles.

Fox et al. (46) encontraron que el fósforo era retenido más fuertemente por suelos con alto contenido de aluminio y minerales poco cristalizados. En general, la intensidad de fijación para varios sistemas mineralógicos fue el siguiente: óxidos amorfos hidratados > complejo goethita-gibbsita cripto cristalina > caolinita > arcilla 2:1.

Para condiciones ácidas, Hemwall (61) señala que la fijación de fósforo se debe a la formación de compuestos insolubles de hierro y

aluminio, provenientes estos elementos de los minerales primarios o de los minerales de arcilla.

Hsu (65) reporta que la fijación de fósforo por precipitación está limitada por el pH, siendo crítica el pH 5,0 o valores inferiores, pero que la limitación no está presente por la fijación química de fósforo debido a la actividad de óxidos y hidróxidos amorfos de Fe y Al, puede ser ocasionada por la magnitud de los valores de pH.

Los estudios de Vélez y Blue (139) revelan que la fijación de fósforo en suelos de Los Diamantes, Costa Rica, fue controlada por reacción de P-precipitación con los materiales cristalinos y por la reacción de fijación química con los materiales amorfos.

Para Reeve y Sumner (113), estudiando oxisoles de Natal, la fijación de P y la toxicidad de Al, funcionan independientemente como factores limitantes de crecimiento; la aparente interacción permanece hasta que el Al sea eliminado como factor tóxico. Atribuyen estos autores que en dichos suelos el fracaso de encalado para reducción de la fijación de fósforo se relaciona con la fijación química del fósforo en la superficie de los sesquióxidos, a pesar de la eliminación de Al intercambiable por encalado.

Woodruff y Kamprath (147) demostraron por medio de isotermas de Langmuir que la neutralización de Al intercambiable reduce al máximo la adsorción de fósforo. Sin embargo, se necesita una alta concentración de fósforo en estos suelos con alta saturación de Al para alcanzar el máximo rendimiento.

En relación con la influencia del aluminio en la disponibilidad de fósforo en solución nutritiva, Foy et al. (45) verificaron que era

necesario una mayor concentración de fósforo para conseguir un desarrollo normal de las plantas cuando el Al estaba presente, especialmente en concentraciones mayores.

Fox et al. (46) encontraron que el aluminio activo tiene influencia en la solubilidad de P, pero el efecto de la mineralogía del suelo fue aparentemente superior, aún cuando el Al activo fue reducido virtualmente a cero por el encalado. Por otra parte, encontraron que la extracción de fósforo en suelos ácidos con óxido amorfos, se incrementó con el encalado. Este efecto fue mayor cuando el encalado se realizó al momento de poner en contacto el fertilizante fosfatado con las raíces de las plantas.

2.7 El encalado y la disponibilidad de fósforo

Generalmente, la reacción del suelo tiene una influencia en la solubilidad o disponibilidad de los elementos nutritivos, y el encalado puede constituir un medio para obtener una mejor absorción de algunos nutrimentos.

Varios autores (13, 40, 41, 45, 50, 99), a través de investigaciones de invernadero y de campo, evidencian efecto benéfico del encalado sobre la disponibilidad y absorción de P por las plantas.

En andepts de Costa Rica, Fassbender y Molina (41) señalan que con el uso de cal se puede mejorar la disponibilidad de fósforo para las plantas por:

- a) Redistribución de los fosfatos inorgánicos debido a la hidrólisis de los fosfatos de hierro y aluminio con la consecuente formación de fosfato de calcio de mayor grado de solubilidad;

- b) Aumento en la mineralización de los fosfatos orgánicos;
- c) Reducción de los procesos de fijación;
- d) Incremento de la actividad iónica del fósforo en la solución del suelo.

En suelos del Cerrado brasileño, Freitas et al. (50) y Mikkelsen et al. (99), encontraron que el encalado aumenta la disponibilidad de fósforo y también influye en la nutrición nitrogenada por el cambio de pH, y así en estos suelos que contienen alto contenido de fósforo, la aplicación de cal puede reducir la necesidad de fertilización fosfatada y nitrogenada..

Estudiando los suelos de El Zamorano en Honduras, Awan (13) afirma que el encalado de los suelos ácidos provoca una liberación de fósforo de la fracción orgánica y aumentó la eficiencia del fósforo aplicado.

Fox et al. (48) informan que pequeñas cantidades de Ca(OH)_2 en suelos extremadamente ácidos de Hawai, con alto contenido de Al intercambiable, aumentaron la absorción de fósforo por diferentes plantas indicadoras. Sin embargo, cuando se elevó el pH del suelo a valores alrededor de 7,0 se manifestó una reducción de la absorción de fósforo.[†]

Iguales resultados encontró Hortenstine (63) trabajando con avena, que la producción aumentaba ligeramente con aplicaciones de encalado y fósforo, pero que la absorción también decrecía a medida que aumentaba el encalado.

Trigoso (135), después de realizar trabajos de laboratorio con suelos de la selva peruana, llegó a la conclusión de que el encalado reducía la fijación y aumentaba la disponibilidad de fósforo para los cultivos.

Fassbender (40) afirma que el encalado tuvo un efecto positivo sobre la absorción de P y en la producción de materia seca de las plantas de tomate. Este efecto se explica a través del sinergismo P-Mg controlado por el antagonismo Ca-Mg y posiblemente aumenta las concentraciones de P presentes en la solución del suelo. Concluye que la solubilidad máxima de los fosfatos en el suelo se alcanzan a los valores de pH entre 5,0 y 6,0 y que a partir de éstos aumenta nuevamente la magnitud de fijación.

En contradicción, Murrmann y Peech (104) señalan que el encalado provocaría una reducción en la solubilidad del fósforo, ocurriendo en estos casos la formación de fluorapatita, mineral que sería el producto final de la reacción o reacciones cuando se aplica superfosfato al suelo.

En estudios de invernadero Maré (85) obtuvo un rápido crecimiento del sorgo con aplicaciones de fósforo. Al encalar superficialmente no modificó la respuesta del cultivo, pero cuando aplicó dosis elevadas de cal, reducía la producción de las plantas.

2.8 Respuesta de los cultivos al encalado

En la literatura se encuentran numerosos informes que indican grandes aumentos en rendimiento de los cultivos cuando se encalan suelos ácidos de los trópicos; sin embargo, las informaciones no son consistentes.

2.8.1 Influencia del encalado en el aumento en rendimiento

Varios autores, trabajando en diversos países de las regiones tropicales, han mencionado que el uso de las enmiendas calcáreas han producido aumentos considerables en los rendimientos de muchos cultivos alimenticios y pastos (5, 12, 19, 50, 64, 128).

En Brasil, grandes respuestas al encalado han sido observadas en los suelos del Campos Cerrado desde los primeros trabajos de McClung et al. (93) en 1957. Posteriormente, otros autores (50, 57, 67, 89, 90, 94, 99, 100, 128) encontraron que el encalado aumentaba notablemente la producción de algodón, caña de azúcar, frijol común, maíz, sorgo, soya y trigo.

Igue y Gargantini (67) señalan que la aplicación de cal y fertilización fosfatada en un latosol rojo oscuro, aumentaba la producción de trigo, cuando se aplicaba 2 ton/ha de cal y 150 kg/ha de P_2O_5 . Igualmente, Mascarenhas et al. (90), Mikkelsen et al. (99) y Miyasaka et al. (100) encontraron aumentos significativos en rendimiento de soya cuando se encalan suelos ácidos. Estos autores obtuvieron las respuestas al encalado, cuando variaron el pH de 5,0 a 5,7 aproximadamente. Concluyen que los efectos benéficos de la cal en el aumento en rendimiento pueden deberse a la mayor disponibilidad de molibdeno al aumentarse el pH.

Freitas et al. (50) también encontraron aumento en el rendimiento de soya y maíz cuando encalaron y fertilizaron el suelo. Mencionan estos autores que la dosis de 5 ton/ha de cal respondía mejor que 10 ton/ha en rango de pH 4,3 a 5,1.

Soares et al. (128) revelan que en la misma condición de "Cerrado", el encalado aumentó la producción de sorgo en grano de 140 por ciento, el maíz de 15 a 40 por ciento y la soya de 7 a 15 por ciento. Señalan que las principales causas de esta variación fueron relacionadas a las diferentes localidades de experimentación.

Martini et al. (89) reportan que el encalado en un Oxisol aumentó el rendimiento de soya, cuando se encaló el suelo para neutralizar el Al (1 - 5% de la saturación de Al), cambio de pH de 5,2 a 5,7 y

Ca + Mg de 5,7 a 8,5 meq/100 g de suelo. También encontraron estos autores un aumento en la nodulación en las raíces, reducción de fijación de fósforo y disminución de toxicidad de Mn en el suelo.

Mascarenhas et al. (90), en un latosol rojo amarillo fuertemente ácido (pH 4,4), encontraron que el encalado y la fertilización fosfatada aumentó la producción de frijol común. Revelan que la aplicación de 4 ton/ha de cal dolomítica cambió poco el pH, pero aumentó considerablemente los contenidos de Ca y Mg y redujo los contenidos de hidrógeno y aluminio intercambiables del suelo.

En Colombia, Spain et al. (130) estudiaron y seleccionaron muchas especies y variedades de plantas, considerando su tolerancia a la acidez e indicando los resultados para maíz, arroz, leguminosas de grano, yuca y algunas especies de pastos. Para maíz la respuesta fue a 2 ton/ha de cal, las variedades tradicionales de arroz respondieron a 0,4 ton/ha, mientras que las semi-enanas dieron respuestas hasta 4 ton/ha. Los frijoles respondieron a hasta 6 ton/ha, mientras que la respuesta de los cowpeas solamente llegó a 0,5 ton/ha. Para los pastos aparentemente se necesita más que todo como fuente de Ca y hay respuestas positivas a encalado de 150 kg/ha. Iguales resultados encontró Parra (105) para suelos derivados de cenizas volcánicas de la región cafetalera Colombiana. Este autor obtuvo aumento en rendimiento en maíz, caña de azúcar, maní y frijol, con aplicaciones de cal. Sin embargo, en el pasto "micay" no se tuvo beneficios del encalado en seis años de experimentación debido posiblemente a los bajos niveles de nitratos empleados en la fertilización.

En diferentes regiones climáticas de Colombia (Sabana de Bogotá,

Antioquia, Cauca, Nariño y Valle), Lotero et al. (80), estudiando el comportamiento de gramíneas y leguminosas, observaron que en general las gramíneas respondieron muy poco a la aplicación de cal, pero en clima medio las gramíneas y leguminosas respondieron más o menos satisfactoriamente. Estos autores concluyen que para un buen establecimiento y alta producción de gramíneas y leguminosas es necesario encalar los suelos ácidos.

En suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica, en condiciones de invernadero, Bornemisza et al. (19), Fassbender (40) y Laroché (78), obtuvieron aumento de la producción de materia seca de tomate, cuando encalaron dichos suelos. Igualmente, Fassbender y Molina (41) reportan un aumento en rendimiento de caña de azúcar para el tercer nivel de encalado (2,8 ton/ha de CaO), mientras que las dosis más altas de encalado produjeron efectos detrimentales por sobreencalado.

En Hawai, Baver y Ayres (17), analizando varios experimentos de campo, concluyen que existe una relación entre el nivel de Ca y la probabilidad de respuesta de caña de azúcar al encalamiento, bien como la magnitud esperada de aumento en rendimiento en estos suelos. Estos autores encontraron que bajos niveles de Ca (por ejemplo cerca de 200 lb/acre-pies) eran suficientes para suplir la necesidad de este elemento. Sin embargo, Ayres (14) detectó respuesta positiva de la caña de azúcar cuando aplicó silicato de calcio a los suelos típicos de caña de Hawai.

Monteith y Sherman (101) señalan que la aplicación de 5000 lb/acre de cal y silicato de calcio separadamente aumentó el rendimiento en el suelo Akaka, pero no aumentó el rendimiento en el suelo Pahi de Hawai. Ellos observaron que la aplicación de 20.000 lb/acre de cal tendía a disminuir los rendimientos de pasto sudán en ambos suelos; sin embargo, igual cantidad de silicato de calcio, aumentaba el rendimiento

en ambos.

En estudios en El Zamorano, Honduras, Awan (12) obtuvo aumentos altamente significativos en rendimiento de maíz (256%), sorgo (153%), frijol común (186%), y cowpea (213%), cuando se aplicó cal y fertilizantes fosfatados.

En condiciones de invernadero, Hortenstein y Blue (64) reportan aumento de rendimiento de sorgo en un suelo Puletan arcillo-arenoso fino de Honduras debido a aplicaciones de cal para elevar el pH del suelo de 5,4 a 6,3.

Trabajando con un Entisol de la zona tropical húmeda del Perú, en condiciones de invernadero, Villachica (144) obtuvo una alta respuesta del sorgo a la aplicación de fósforo al suelo, la cual fue aumentada cuanto mayor fue la dosis de cal aplicada. Por otra parte, Villachica y Quevedo (143) no encontraron respuesta en rendimiento del sorgo, cuando encalaron un Inceptisol con pH 5,0 hasta pH 5,6; 6,3; 6,8 y 7,4. Sin embargo, estos autores encontraron que el encalado aumentó la concentración de P y Ca y disminuyó la concentración de N, Mg y Zn.

En Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico, Abruña y Chandler (3) y Abruña et al. (2) mencionan notables aumentos de rendimiento de caña de azúcar cuando disminuía el aluminio intercambiable para bajos niveles de saturación (10 por ciento de la suma de bases) por encalado. En otro estudio, Abruña et al. (4) señalan que los rendimientos de tabaco curado en tres Ultisoles aumentaron con encalado hasta aproximadamente un pH 5,0 y observaron una relación negativa altamente significativa entre la producción y el Al intercambiable.

En otro experimento en Puerto Rico, Abruña et al. (5) encontraron

que la respuesta en rendimiento de maíz a la aplicación de cal en cinco Ultisoles fue muy satisfactoria, en contraposición con la escasa respuesta obtenida en un Oxisol, pero que la respuesta de los frijoles verdes al encalamiento en los Ultisoles y en el Oxisol fue pronunciada. Concluyen estos autores que el rendimiento de maíz y de frijoles verdes en cinco Ultisoles y de frijoles verdes en un Oxisol estaba relacionado con el porcentaje de saturación de Al, en el ámbito de 0 - 68 por ciento.

2.8.2 Efecto detrimental del sobreencalado

En muchas investigaciones en los trópicos se menciona que los requerimientos de cal basados en las técnicas utilizadas en las regiones templadas han producido efectos detrimentales. En las últimas regiones, las dosis de cal son usualmente recomendadas para elevar el pH a algún valor predeterminado. Encalando en base a este principio, Freitas y Pratt (49), en Campos Cerrado de Brasil, reportan una disminución de rendimiento de *Phaseolus* y *Stylosanthes* en algunos suelos, cuando la dosis elevaba el pH a aproximadamente 6,4. En la misma región, Freitas et al. (50) y Soares et al. (128) encontraron que la producción de maíz, sorgo y soya, tendían a disminuir cuando las aplicaciones de cal eran superiores a 10 ton/ha.

En estudios realizados por Monteith y Sherman (101) en Hawai, se encontró que el pasto sudán crecía muy bien en latosoles ácidos cuando la aplicación de cal alcanzaba pH 5,5, pero disminuyó drásticamente su rendimiento cuando se encalaba hasta pH 7,0.

En suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia, Parra (105) encontró una fuerte disminución en el rendimiento de frijol cuando se aplicó más de 2 ton/ha de cal.

Por otra parte, Spain et al. (130), en Oxisoles de Carimagua, Colombia, mencionan que la mayoría de los cultivares de yuca, fueron afectados adversamente por 6 ton/ha de cal y los rendimientos de muchos de ellos redujeron con sólo 2 ton/ha.

En Costa Rica, Bornemisza et al. (19) encontraron que el rendimiento de materia seca de tomate, aumentaba hasta 12 meq/100 g de calcio en el suelo Colorado, pero después de este nivel empezó a disminuir el rendimiento, llegando a ser inferior al testigo, cuando se aplicó 36 meq/100 g de calcio.

En otro estudio en Costa Rica, Fassbender y Molina (41) encontraron que la producción de materia seca de tomate aumentaba con las dosis iniciales de cal pero que al sobrepasar el ámbito de pH 5,5 a 6,0 se producía un efecto negativo. Estos autores explican que este resultado podría ser debido a un desbalance catiónico entre Ca, Mg y K o por deficiencia de algún otro elemento nutritivo.

En condición de campo con el mismo suelo, Morelli (102) encontró que la cosecha en azúcar refinado aumentó de 13,6 ton/ha a 14,8 y 16,6 ton/ha al aplicarse 1,4 y 2,8 ton de CaO/ha. Se observó un sobreencalado, disminuyendo la cosecha a 15,5 y 15,6 ton/ha con dosis de 5,6 y 11,2 ron de CaO/ha.

Fox y Plucknett (47) demostraron que el peligro del sobreencalado en algunos suelos de Hawai, está vinculado con la disminución de fósforo disponible y posiblemente induce a deficiencia de cinc para algunos cultivos. Igualmente, Matsusaka y Sherman (91) mencionan que altas dosis de cal puede saturar el complejo de cambio y provocar serios desequilibrios entre diversos nutrimentos.

Por otro lado, Ríos y Martini (115), trabajando en suelos de Panamá, concluyen que para elevar el pH de 6 a 7 sería necesario usar dosis altas de encalado, las cuales provocarían una alta concentración de Ca, ocasionando así un desequilibrio nutricional expresado por las relaciones inadecuadas de Ca/Mg, Ca/K y Ca/elementos menores.

Según Marín (86) los efectos detrimentales de sobreencalado están correlacionados con las deficiencias de los micronutrientes, particularmente de Mn y Fe, que puede ser inducidos en cultivos tales como soya, maíz, trigo y plantas hortícolas.

Gupta et al. (58) observaron que al aumentar el pH del suelo aumentó el contenido de Mo y Cu en el tejido vegetal; mientras que el B, Mn y Zn disminuyen. Al encalar cerca de pH 5,6 reducía la disponibilidad de Mn y Zn en el suelo, pero por encima de 6,1, disminuía la disponibilidad de boro. Igualmente, observaron Wear y Patterson (149), en cultivo de alfafa en invernadero, que en suelos de diferentes texturas al aumentar el pH de 5,0 a 7,0 el boro se hizo menos disponible para las plantas.

Estudiando el comportamiento de un horizonte Ap de un Spodosol alto en Al intercambiable y con CIC dependiente del pH, Bartlett y McIntosh (16) reportan que el encalado para elevar el pH del suelo a 6,4, producía deficiencias de K en las plantas de tomate, por disminuir la disponibilidad de este elemento.

2.9 Influencia del encalado en el crecimiento de las raíces

Existe muy poca información acerca de la respuesta de las raíces a acidez del suelo en los trópicos.

Foy y Brown (46) han demostrado que las plantas en general son

poco tolerantes a altas concentraciones de Al. Observaron que el crecimiento de las raíces de algodón en solución nutritiva era limitado por cantidades tóxicas de Al (1 ppm) y esta limitación del sistema radical, reduce la toma de agua y de nutrimentos, reduciendo el crecimiento de la planta. Igualmente, Ríos y Pearson (116) mencionan que una solución nutritiva con 1 ppm de Al-soluble hace imposible el crecimiento de plántulas de algodón y que 0,5 ppm reduce el crecimiento de las raíces y causa severos síntomas de toxicidad de aluminio.

Por otra parte, Cate y Sukhai (26) concluyen que concentraciones de Al-soluble de 1 a 2 ppm en solución nutritiva, inhibía el crecimiento de las raíces de plántulas de arroz y que altas concentraciones (25 ppm) impedían totalmente el crecimiento de las raíces.

Trabajando con soya en solución nutritiva, Lund (82) observó que niveles de 10 ppm de Ca, 0,5 ppm de Al reducen la elongación de las raíces y que 1 ppm o 2 ppm de Al inhibe completamente la elongación. Sin embargo, cuando la solución nutritiva contiene 40 ppm de Ca, no hay efecto del 0,5 y 1,0 ppm de Al, pero ni altos niveles de Ca pudieron inhibir fuertes toxicidad de Al.

Brenes y Pearson (22) reportan que las raíces del sorgo fueron altamente sensibles, las raíces de maíz fueron moderadamente sensibles, y que las raíces del pasto Estrella (*Cynodon plectostachyus*) fueron muy tolerantes al Al en la solución del suelo. Estos autores observaron también que el crecimiento de las raíces de maíz y sorgo disminuyen bruscamente con niveles crecientes de Al en la solución del suelo, mientras que no hubo diferencias en rendimiento del pasto Estrella cuando la concentración de Al en la solución del suelo aumentó hasta 115 μM correspondiente a un pH de 3,95.

Por otro lado, en los mismos suelos, Abruña et al. (2) encontraron que en las parcelas no encaladas la disminución en rendimiento de los pastos fue debido al Al, que provocó deformaciones en las raíces de las plantas. En otro trabajo, Abruña et al. (5) reportan que el rendimiento de maíz disminuía a medida que el Al ascendía al 15 por ciento de los cationes intercambiables.

Hernández-Medina et al. (62) observaron que los arbolitos de acerola (*Malpighia perniciifolia* L.) sembrados en los suelos encalados a un pH de 5,5 y 6,5 respectivamente, tenían significativamente más raíces que los sembrados en el suelo sin encalar (pH 4,5). Estos arbustos crecieron en forma vigorosa, con follaje verde oscuro, y el rendimiento por acre fue significativamente superior al de los que no recibieron cal y cuyo desarrollo vegetativo fue lento y su follaje verde pálido o verde amarillento.

Adams y Pearson (6) señalan que el crecimiento de las raíces depende también de un nivel adecuado de Ca en relación a los otros cationes en solución; sin embargo, la deficiencia de Ca no es más difícil de corregir que la toxicidad de Al, porque relativamente pequeñas cantidades de una enmienda soluble, tal como yeso, corrige la deficiencia de Ca, igualmente en toda la profundidad del perfil.

Generalmente, se ignora el sub-suelo al hacer recomendaciones de manejo. Sin embargo, las plantas y especialmente las perennes, dependen grandemente del sub-suelo en muchos aspectos. La acidez en el sub-suelo puede restringir la penetración de las raíces tan efectivamente como una capa de roca (109).

En estudio en cámara de crecimiento con suelo bien encalado y

fertilizado, los cuales tenían subsuelo ajustado a tres pH diferentes: 5,0; 5,5 y 6,5, Pearson (109) observó que las raíces del algodón fueron las más sensibles a la acidez en los tres subsuelos; el maní no mostró efecto debido a la acidez en cuanto a la penetración de las raíces dentro del rango estudiado y la soya presentó una reacción intermedia.

En otro trabajo en Puerto Rico, con diferentes cultivos tropicales, este autor encontró un rango bastante grande en tolerancia de diferentes especies a la acidez del subsuelo. Por ejemplo, las raíces de café no fueron afectadas por pH tan bajos como 4,2, mientras que las del tabaco a este pH fueron reducidas a una fracción del crecimiento producido cuando el pH era de 6,5. La caña de azúcar y el pasto napier resultaron intermedios en sensibilidad.

El aluminio soluble en la solución del suelo, es en general el factor principalmente responsable de la restricción del crecimiento de las raíces a bajos niveles de pH y que puede ser precipitado por encalado. Al mismo tiempo, en el subsuelo el Al puede permanecer soluble y perjudicial al crecimiento de las raíces de las plantas y disminuir el rendimiento del cultivo después del encalado (99, 109, 128, 136).

Mikkelsen et al., (99) han demostrado una reacción favorable a la incorporación de cal a mayor profundidad. La aplicación de cal, incorporada a 10 cm de profundidad por medio de una rastra de disco, aumentó la producción de algodón en el Cerrado brasileño. Igualmente, Soares et al. (128) encontraron en esta región que la incorporación de caliza y eliminación de los niveles tóxicos de saturación de Al a la profundidad de 30 cm aproximadamente, duplicó el crecimiento de las raíces de las plantas por unidad de volumen de suelo en la profundidad comprendida entre 14 y 30 cm. Sin embargo, no se conoce ningún método práctico

para lograr este objetivo a profundidades mayores de 25 a 30 cm.

Morelli (102) observó que después de 39 meses de aplicación de enmienda calcárea en un andosol de Costa Rica, el pH en los primeros 20 cm del suelo subió progresivamente de 4,1 a 5,6 al aplicarse hasta 11,6 ton/ha de CaO; sin embargo, el alcance más grande fue entre los 20 y 40 cm con aumento del pH hasta de dos unidades. El efecto del encalado disminuyó después con la profundidad del suelo y a los 100 cm no se manifestó cambio alguno. El comportamiento de Ca cambiante presentó una tendencia similar; la zona de mayor influencia se registró también entre 20 y 40 cm con una diferencia máxima de 16 meq/100 g de suelo.

Uehara y Keng (136) señalan que cuando la cal es aplicada y mezclada con la capa arable de suelos de carga variable, la mayoría se gasta en el desarrollo de cargas negativas. Estas cargas negativas a su vez tienen que ser balanceadas por iones de calcio en el sitio donde la cal fue aplicada y, por consiguiente, muy poca cal aplicada pasa al subsuelo. Así, corregir la acidez del subsuelo es aún un serio problema en los trópicos.

2.10 Influencia del encalado sobre los microorganismos del suelo

La población y la actividad de los microorganismos del suelo cambian mucho con los cambios de la reacción del mismo. Sin embargo, muchos microorganismos del suelo actúan sobre un rango muy amplio de pH, aunque la mayoría de ellos se desarrollan mejor bajo pH neutro o ligeramente alcalino (34). De este modo, las transformaciones de los elementos nutritivos tales como N, P y S del estado orgánico al inorgánico, y la fijación simbiótica o no-simbiótica del N son afectados por el grado de encalado.

Goepfert y Freire (55) encontraron que el pH del suelo es un factor muy importante en el establecimiento y funcionamiento de los nódulos para la fijación simbiótica del nitrógeno por el frijol común. Estos autores señalan que el pH puede tener influencia directa sobre las bacterias e indirectamente sobre ellos a través de la fisiología de la planta hospedera.

En los suelos de los Llanos Orientales de Colombia, Graham y Hubbel (56) reportan que el *Rhizobium* del grupo cowpea se encuentra ampliamente difundida en dichos suelos, pero debido a su alta acidez, muy pocas plantas pueden formar nódulos.

En un suelo de Costa Rica, serie Colorado, Trigoso (134) observó que la cantidad de nitrógeno fijado por los nódulos de frijol común depende en gran medida de las aplicaciones de Ca, Mg y de fósforo.

En ensayos de invernadero con soya, França y Dobereiner (48) observaron que el encalado disminuía la nodulación en ausencia de boro, mientras que la ausencia de cal y presencia de molibdeno afectaron la fijación simbiótica del nitrógeno.

Almeida et al. (8) informan que el peso de los nódulos del frijol común fue aumentado por la aplicación de fósforo y cal. Sin embargo, estos autores no observaron correlaciones entre la producción y la nodulación.

En estudios con suelos ácidos del Cerrado brasileño, Mascarenhas et al. (90) encontraron que el encalado aumentó la nodulación, pero la fertilización nitrogenada tendía a reducirla, sobre todo cuando se usó la mayor dosis de nitrógeno (60 kg/ha). Observaron también que la pelletización de las semillas inoculadas con CaCO_3 reducía los "stands"

tanto en la presencia como en la ausencia de encalado, y su efecto sobre la producción fue negativo.

Según Fassbender (42), la relación ácido/base es importante de manera especial, en medios ecológicos naturales; muchas veces un exceso de ácido y la falta de nutrimentos minerales, especialmente Ca y microelementos, pueden limitar la mineralización de la materia orgánica.

Ayres (14) encontró que la descomposición de la materia orgánica en suelos de Hawai fue favorecida por encalado. Este autor también observó que en un período de incubación de ocho meses, el nitrógeno aumentó de 35 ppm a 125 ppm con esta práctica. Igualmente informan Bornemisza et al. (19) que el encalado hace más rápida la descomposición de la materia orgánica de un suelo derivado de cenizas volcánicas de Costa Rica.

2.11 Efecto del encalado sobre las propiedades físicas

Una buena estructura es una de las características más importantes de los suelos ácidos infértiles que contienen minerales cuyas cargas son dependientes del pH. La alta estabilidad de los agregados en estos suelos se ha atribuido frecuentemente a la presencia de óxido de hierro (59, 136).

Jones y Uehara (71) mencionan que capas de sustancias amorfas, revistiendo las partículas del suelo, pueden ser otra causa de agregación del suelo. Dichas capas actúan como agentes cementantes y juegan un papel muy importante en el comportamiento físico y químico de los suelos.

Harris et al. (60) establecen que la estabilización de los agregados del suelo es también influenciada por las sustancias orgánicas que son producidas por microorganismos. Ellos señalan que el encalado

frecuentemente estimula la actividad microbial y en esto puede basarse un efecto benéfico en la estructura observada para ciertos tipos de suelo.

Igualmente, varios autores (24, 42, 133) han reportado efecto benéfico del encalado en las propiedades físicas del suelo, tales como: estructura (agregación de las partículas), espacio aéreo y movimiento de agua. En contraste, otros investigadores (53, 59, 124, 141) han mencionado que el encalado deteriora la estructura de los suelos.

Harris et al. (60) señalan que el encalado en los suelos ácidos donde el hierro promueve la agregación, no destruye la floculación del suelo. Sin embargo, se nota como resultado la formación de agregados muy pequeños y una reducción de la estabilidad de los agregados formados por degradación microbiana. El resultado sería una disminución en la permeabilidad del suelo y consecuentemente un aumento del peligro de erosión.

Schuffelen y Middlenburg (124) encontraron en suelos lateríticos de Java que el encalado para elevar el pH a 6,5, reducía en 90 por ciento la tasa de percolación. Explican por el efecto de peptización de los iones hidroxilos que competen fuertemente con el efecto de coagulación de los iones de Ca; de manera que causan el deterioro de la estructura del suelo.

Ghani et al. (53) y Venema (141) reportan resultados similares para estos suelos, indicando poca eficiencia o acción negativa de encalado.

Fassbender (42) y Hardy (59) señalan que dentro de los efectos deteriorantes del sobreencalado, la destrucción de la estructura porosa

granular que es característica de los suelos lateríticos constituye un factor preponderante que debe ser considerado en el manejo de dichos suelos.

2.12 Efecto residual de la cal

En general, los efectos de la aplicación de cal desaparecen mucho más rápidamente en los trópicos húmedos que en las regiones templadas. Esto puede ser explicado de modo general por la alta precipitación y de la permeabilidad del suelo. Sin embargo, el efecto residual puede ser previsto en base a la textura del suelo y su estructura, la precipitación, y particularmente, por los residuos de los fertilizantes nitrogenados ácidos.

Velly (140) observó que el sulfato de amonio aplicado por varios años, provoca una acidificación acompañada de síntomas de toxicidad para las plantas de maíz, algodón y maní. Estos síntomas estaban relacionados con la disminución de pH y el aumento del contenido de Al intercambiable del suelo.

Pearson et al. (108) demostraron que el pH del suelo podría reducirse en más de una unidad aún en suelo bien tamponeado, aplicando a los pastos 900 kg de N/ha/año en forma de sulfato de amonio durante dos años. Igualmente, Abruña et al. (5) señalan que pH bajos con valores de 3,9 hasta 4,3, resultaron de la fertilización previamente con sulfato de amonio de suelos de Puerto Rico.

En un latosol rojo-amarillo del Estado de Sao Paulo, Brasil, Freitas y van Raij (51) encontraron que los efectos residuales del encalado sobre el rendimiento de algodón, maíz, maní y soya, pudieron ser observados aún después de seis años de aplicación. Los resultados

analíticos indican que estos efectos podrían haber permanecido si el experimento hubiese continuado.

En el Cerrado brasileño, Soares et al. (128) indican que después de cinco años, la aplicación de 5 ton/ha de cal fue suficiente para mantener la saturación de aluminio a un nivel inferior a 10 por ciento, que se considera como condición ideal para muchos cultivos en estos suelos.

En un experimento rotatorio con alfalfa (*Medicago sativa*), trefoil (*Lotus corniculatus*) y timothi (*Phleum pratense*), Week y Lathwell (149) observaron que la incorporación de 2 ton/ha de cal mostró un efecto residual considerable a los catorce años después de su aplicación.

En Colombia, Parra (105) encontró que la mejora en rendimiento de maíz, después de aplicar 2 ton/ha de cal en suelos derivados de cenizas volcánicas, ha disminuído poco, aún después de 12 cosechas.

Vicente-Chandler et al. (142) encontraron que para la producción de pastos en suelos ácidos de Puerto Rico, fueron efectivos encalados a cada dos años en aplicaciones anuales, aún con el uso de altas dosis de fertilizantes nitrogenados acidificantes.

Mahilun et al. (84) hallaron que la incorporación de 5 ton/ha de cal desaparecería casi completamente a los siete años de haber sido aplicado a un suelo derivado de cenizas volcánicas de Hawai.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización

La presente investigación se llevó a cabo en los laboratorios e invernaderos del Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), localizado en Turrialba, Costa Rica.

Los suelos utilizados en el ensayo corresponden a los horizontes superficiales (0 - 15 cm) de tres series de suelo de la zona oriental de la Meseta Central de Costa Rica: Serie Colorado (Campo Gamma), Serie Instituto (Experimento central), ambas en el área del CATIE, y Serie Paraíso (potrero natural), margen derecha de la carretera Turrialba-San José, a 2 Km aproximadamente antes de llegar a la ciudad de Paraíso.

3.2 Suelos

Varios autores (7, 33, 59, 83) han estudiado estos suelos en sus varios aspectos.

La serie Colorado posee suelos bien desarrollados debido al gran tiempo en que han estado expuestos a la meteorización y continua lixiviación (33). Se originan de rocas ígneas básicas o sub-básicas pertenecientes al Mioceno superior o al Plioceno inferior (59). El material parental, en esta serie está formado por aglomerados viejos de lavas con materiales arcilloso caolinítico, altamente ferruginosos. Ocupan las áreas montañosas del CATIE, con pendientes entre 15 y 30 por ciento (59). Aguirre (7) la clasificó según la taxonomía de suelos como Typic Dystropept, muy fino, mixto, isohypertérmico.

Los suelos pertenecientes a la serie Instituto, son de origen aluvial fluvio-lacustre del cuaternario, derivados en su mayoría de

materiales volcánicos fragmentarios y piroclástico andesítico (33). Esta serie ocupa la faja central de las tierras bajas del CATIE (59). Descansan sobre arena gruesa variable y depósito de gravas, las cuales están meteorizadas y dan lugar a un drenaje interno impedido (59). De acuerdo a la taxonomía de suelos, Aguirre (7) la clasificó como Typic Dýstropept, fino, mixto, isohypertérmico.

Los suelos de la serie Paraíso son muy semejantes a los de la serie Colorado, excepto que esta serie ocupa una área con pendiente más suave y una topografía redondeada (33). El material parental es andesita, hipersteno y augita, pero las rocas ocurren en forma de materiales fragmentados (piroclásticos) más bien que lava, y son profundamente meteorizados (33). Su capa superficial es enriquecida con cenizas volcánicas geológicamente reciente, mientras que la serie Colorado es menos afectada (34).

Según Macías (83) se clasifica como Typic Humitropept, muy fino, mixto, isotérmico. Bornemisza e Igue (20) encontraron que los suelos de las series Colorado y Paraíso presentan gran cantidad de sesquióxidos libres, mientras que en los suelos de la serie Instituto, se observan en menor cantidad.

En el Cuadro 1 se presentan los resultados analíticos de las tres series de suelos antes de tratamiento con cal.

3.3 Aplicación del encalado e incubación

Las muestras escogidas para ser encaladas fueron sometidas a una incubación por un período de treinta días, manteniéndose la humedad del suelo aproximadamente a capacidad de campo durante este tiempo. Se usó agua de lluvia para el regadío.

Cuadro 1. Características químicas de los suelos antes del encalado.

Determinación	S U E L O		
	Colorado	Instituto	Paraíso
pH en H ₂ O	4,9	5,1	4,8
pH en KCl N	4,0	4,3	4,0
% MO	5,4	7,4	8,4
CIC meq/100 g	23,4	26,8	30,6
Ca meq/100 g	1,90	2,47	3,08
Mg meq/100 g	1,32	1,40	2,32
K meq/100 g	0,83	0,69	0,45
Na meq/100 g	0,15	0,15	0,19
Acidez intercam. meq/100 g	1,63	0,72	1,31
S.B. %	72,0	86,7	82,2
Ca/Mg	1,44	1,76	1,33
Ca/K	2,29	3,58	6,84
Ca + Mg/K	3,88	5,61	12,00

Las dosis del material encalante se aplicaron de acuerdo a los requerimientos de cal determinados por el método de la curva de titulación (1) y por el método de acidez intercambiable (72).

En el Cuadro 2 se presentan las cantidades de calcio en meq/100 g de suelo que fueron aplicadas en los diferentes tratamientos. Se usó como material encalante cal viva comercial, pasada por un tamíz 60.

Transcurrido el tiempo de incubación se tomaron muestras de cada

Cuadro 2. Cantidad de Ca en meq/100 g de suelo, correspondiente a los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Colorado	Instituto	Paraíso
	Meq de Ca/100 g		
0	--	--	--
1	2,5	1,0	2,0
2	5,0	2,0	4,0
3	6,5	4,0	7,0
4	8,0	6,0	9,0

maceta. Sub-muestras de las mismas fueron secadas al aire y tamizadas al tamaño requerido por cada método para determinaciones de pH, acidez intercambiable, bases cambiables (Ca, Mg, K y Na), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y materia orgánica.

3.4 Estudio de invernadero

Con la finalidad de evaluar los posibles efectos del encalado se realizó un experimento en invernadero con macetas de 3 kg de capacidad, utilizando los suelos incubados con cal previamente. Se utilizó el sorgo (*Sorghum vulgare* L.) como planta indicadora. La siembra se efectuó directamente en las macetas, después de germinadas se hicieron raleos sucesivos hasta mantener diez plantas por macetas.

Se aplicó uniformemente en todas las macetas una fertilización básica de N, P, K y microelementos, para hacer que los efectos de la cal no fueran enmascarados por la carencia de nutrimentos. Las dosis y las fuentes de los nutrimentos se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Cantidad de nutrimentos aplicados y fuente utilizada, para los estudios de invernadero, según Laroche (78).

Nutrimentos	ppm	Fuente ^{1/}
N	160	NH_4NO_3
P	40	$\text{NaHPO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$
	210	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$
K	200	KCl
Fe	20	Fe-citrato
Zn	20	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$
Mo	20	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$
Cu	20	$\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$
Mn	16	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
B	8	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$

^{1/} Reactivos químicamente puros.

Las fuentes fosfatadas cristalinas fueron aplicadas finamente molidas y colocadas a la profundidad del tercio superior de la maceta.

El elemento magnesio fue aplicado como óxido de magnesio (MgO) químicamente puro en relación Ca/Mg de 4:1, mezclados con el tercio superior de la maceta, para evitar el desbalance catiónico con las aplicaciones de calcio (78).

Los otros nutrimentos fueron aplicados en solución.

A los 35 días después de la siembra, se cortó la parte aérea de las plantas a cinco centímetros del suelo. Se determinó la producción de materia seca, al material secado en estufa con ventilación forzada a

70°C por 48 horas. Se tomaron muestras de suelo de todas las macetas para determinar pH en agua y en cloruro de potasio normal.

Cinco días después del corte del cultivo se aplicó nitrógeno, usando la mitad de la dosis indicada para la siembra. Se dejó que las plantas rebrotaran y posteriormente se efectuaron dos cortes espaciados uno de otro de 28 días y se determinó la producción de materia seca en ambos cortes. Después de estos cortes también se colectó muestras de suelo para determinar pH en agua y KCl 1 N; mientras que, después del tercer corte, se determinó acidez cambiante, bases cambiables, capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica.

Después del segundo corte, se fertilizó el cultivo, usando la mi tad de la dosis inicial recomendada.

Cronograma de ejecución y observaciones

El tiempo de duración del experimento en el invernadero fue de tres meses, iniciándose el 13 de marzo de 1976.

Durante este período, se estableció el siguiente orden para los principales trabajos:

0 día	.....	encalado de las macetas
30 días	.....	toma de muestras y fertilización
35 días	.....	siembra del sorgo
45 días	.....	raleo para 10 plantas por maceta
50 días	.....	1 ^a observación del estado vegetativo
65 días	.....	2 ^a observación del estado vegetativo
70 días	.....	1er corte del cultivo y toma de muestra
75 días	.....	fertilización nitrogenada
85 días	.....	observación del estado vegetativo

98 días	2 ^o corte del cultivo y toma de muestra
103 días	fertilización
113 días	observación del estado vegetativo
126 días	3er corte del cultivo y toma de muestra.

3.5 Diseño experimental y tratamiento

- a) Las macetas se arreglaron en el invernadero de acuerdo a un diseño irrestrictamente al azar con cinco repeticiones;
- b) Identificación de los tratamientos:

Tratamiento 0: testigo;

Tratamiento 1: dosis de cal equivalente a 1,5 veces la acidez intercambiable;

Tratamiento 2: dosis de cal equivalente a 3,0 veces la acidez intercambiable;

Tratamiento 3: dosis de cal equivalente al promedio entre los tratamientos 2 y 4;

Tratamiento 4: dosis de cal necesaria para elevar el pH del suelo a 6,5, según curva de titulación.

Los resultados analíticos correspondientes al tratamiento 4, se incluyen en el Cuadro 1 y en la Figura 1 del Apéndice.

3.6 Determinaciones de laboratorio

Se realizaron análisis de suelo correspondientes a tres etapas del experimento: a) antes del encalado; b) después del período de incubación con cal; y c) después del último corte. Los análisis se efectuaron en muestras secas al aire y tamizadas al tamaño requerido por cada método.

Para la determinación de punto de carga cero (ZPC) y cargas eléctricas del suelo, se utilizó muestras de los tratamientos 0 (testigo), 2 y 4, correspondientes a dos épocas: a) antes de encalar; y b) después del período de incubación con cal.

3.6.1 Requerimiento de cal

a) Método de la curva de titulación

Para esta determinación se siguió el método de Dunn (35), modificado por Abruña y Chandler (1). En este método los requerimientos de cal se basan en la curva de titulación potenciométrica, cuando se agrega diferentes cantidades de hidróxido de calcio 0,03 N al suelo.

b) Método de la acidez intercambiable

La acidez intercambiable se determinó por el método descrito por Kamprath (72), basado en el método de Yuan (151). Se usó el KCl 1N para extracción y se tituló con hidróxido de sodio 0,01 N. El aluminio intercambiable fue cuantificado por el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 303.

3.6.2 Punto de carga cero (ZPC)

Esta determinación se hizo según el método descrito por van Raij y Peech (137), modificado por Uehara y Keng (136). El ZPC se determina por el punto de intersección de las curvas de titulación potenciométrica, obtenidas con muestras suspendidas de suelo en cuatro diferentes concentraciones de cloruro de sodio (NaCl) con adiciones de diferentes concentraciones de ácido clorídrico (HCl) o de hidróxido de sodio (NaOH). La intersección de las curvas determina el pH del ZPC que refleja la condición de igualdad de absorción de iones H^+ y OH^- , es decir, de un potencial superficial cuyas cargas son iguales a cero.

3.6.3 Cargas eléctricas del suelo

Para esta determinación se utilizó el método descrito por Schofield (122), modificado por van Raij y Peech (137). Este método se basa en la determinación de las cargas positivas y negativas del suelo por retención directa de iones. Estas cargas fueron determinadas en soluciones de NaCl , CaCl_2 y MgSO_4 en diferentes concentraciones. Las cargas netas se calculó por la suma algebraica de las cargas positivas con las cargas negativas.

Los cationes Na, Ca y Mg fueron cuantificados en el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 303.

El anión cloruro se determinó por argentometría según Jackson (68) y el sulfato por el método descrito por Hunter (66).

3.6.4 Reacción del suelo (pH)

Se efectuó por la técnica descrita por Saíz del Río y Bornemisza (119). Se determinó en agua y en KCl 1 N, usando la relación suelo-agua (1:2,5). Las lecturas fueron hechas en potenciómetro Coleman, modelo 39 con electrodo de vidrio.

3.6.5 Materia orgánica

Se determinó de acuerdo con el método de Walkley y Black (145), modificado por Saíz del Río y Bornemisza (119). Consiste fundamentalmente en la oxidación de la materia orgánica del suelo por dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en medio sulfúrico, siendo el exceso de dicromato titulado con sal de Mohr (sulfato ferroso amoniacal).

3.6.6 Bases cambiables

Las bases cambiables se determinó por el método de Peech (110). Se usó como solución extractora acetato de amonio pH 4,8. Las lecturas

de los cationes (Ca, Mg, K y Na) se realizaron en el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 303.

3.6.7 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Se determinó mediante el método descrito por Rich (114). Básicamente, consiste de la saturación del suelo con solución de CaCl_2 1 N pH 5,0 y remoción con acetato de magnesio 1 N. Se usó este método ya que en los trabajos de Fuentes (52) indican menos errores que las otras técnicas. Las lecturas del calcio se hicieron en el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 303.

3.6.8 Análisis de los tejidos vegetales

Las muestras de materia seca fueron molidas en un molino tipo Wiley, y se les pasó por un tamíz de 20 mallas por pulgada cuadrada.

La digestión de la materia seca se efectuó con una mezcla de ácido nítrico y perclórico en relación 5:1, según las recomendaciones descritas por Jackson (68). El residuo se diluyó a 100 ml de agua destilada, de éste se tomaron alícuotas para determinación de Ca, Mg, K y P. Los cationes se leyeron en el espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 303. El fósforo se determinó colorimétricamente usando la mezcla sulfomolibdica indicada por Jackson (68).

3.7 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza, y prueba de Tukey. También se hizo análisis de regresión para determinar la relación causa-efecto entre las variables más importantes. Además, se probaron contrastes ortogonales para observar los efectos del encalado en los diferentes tratamientos.

Para analizar los efectos del encalado sobre el pH y acidez del

suelo, producción de materia seca, y absorción de fósforo por las plantas, se emplearon las ecuaciones siguientes:

Lineal	$Y_i = a + bx_i$
Logarítmica	$Y_i = b_0 X_i^{b_1}$
Cuadrática	$Y_i = a + b_1 X_i + b_2 X_i^2$
Geométrica	$Y_i = b_0 b_1^{x_i}$
Raíz cuadrática	$Y_i = b_0 + b_1 X_i + b_2 X_i$
Gama	$Y_i = b_0 e^{-b_1 X_i} X_i^2$

donde: Y_i = variable de respuesta

X_i = variable aleatoria

a, b_0, e = constantes

b_1 = tasa lineal

b_2 = tasa logarítmica

Mediante las ecuaciones citadas, fue posible determinar las tendencias que se observaron en las variables dependientes, en respuesta al encalado.

Los datos fueron procesados en la computadora IBM-1620-40K, de la Unidad de Procesamiento de Datos del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA (IICA), en San José, Costa Rica.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Efectos del encalado

4.1.1 Efecto sobre algunas propiedades químicas de los suelos

En los Cuadros 22 y 23 del Apéndice, pueden apreciarse los efectos del encalado sobre algunas propiedades químicas del suelo tales como el pH, CIC, bases cambiabiles, acidez cambiabie y saturación de bases, antes de la siembra (después del período de incubación con cal) y después del último corte del sorgo. Se discutirán los efectos sobre el pH y la acidez intercambiabie.

4.1.1.1 Efecto en el pH

En el Cuadro 2 del Apéndice se presentan los valores de pH en H_2O y en KCl 1N correspondientes a cada nivel de encalado de los suelos Colorado, Instituto y Paraíso en las dos etapas del experimento: a) después de la incubación con cal, y b) después del último corte del cultivo.

Se observa en dichos cuadros que el pH es afectado conforme aumentan las dosis de encalado y las épocas de muestreo.

En la Fig. 1 se representan los efectos de las diferentes dosis de cal y los valores de pH resultantes para los tres suelos, en caso de las dos diferentes épocas de muestreo. En ellas se pueden observar un aumento lineal del pH con las dosis crecientes de cal. Estos aumentos lineales fueron observados para suelos tropicales (128) y son el resultado del uso de la cal en aumentar las cargas negativas del coloide.

En el Cuadro 4 del Apéndice, se presentan las ecuaciones de regresión lineal y los valores de "R". Se observa una respuesta altamente significativa entre las dosis de encalado y los valores de pH medidos en agua.

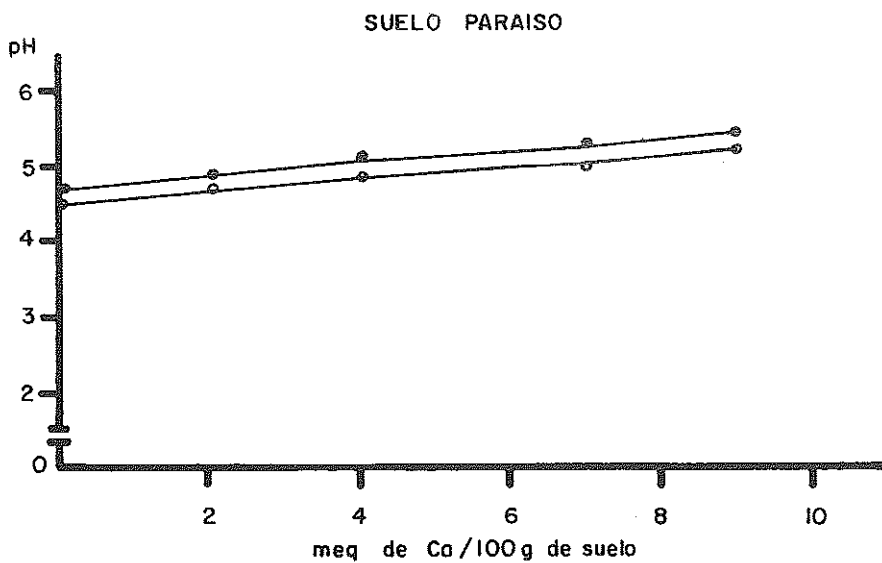
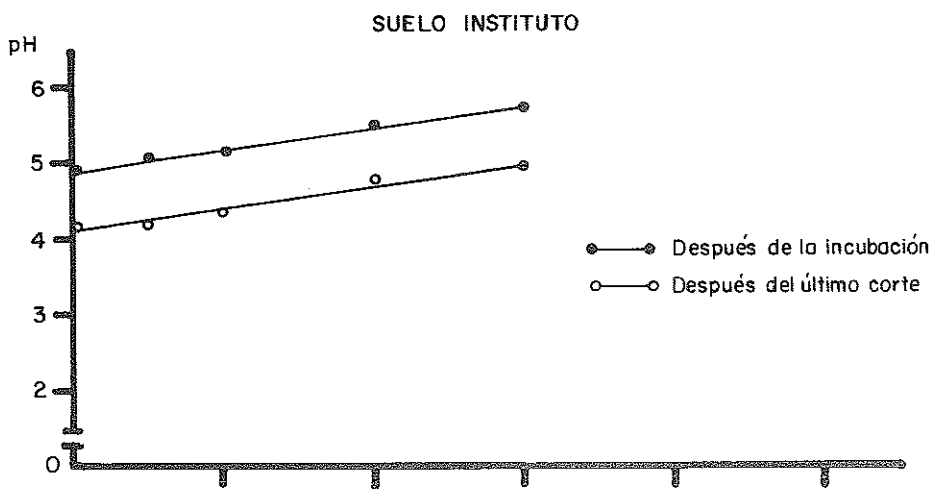
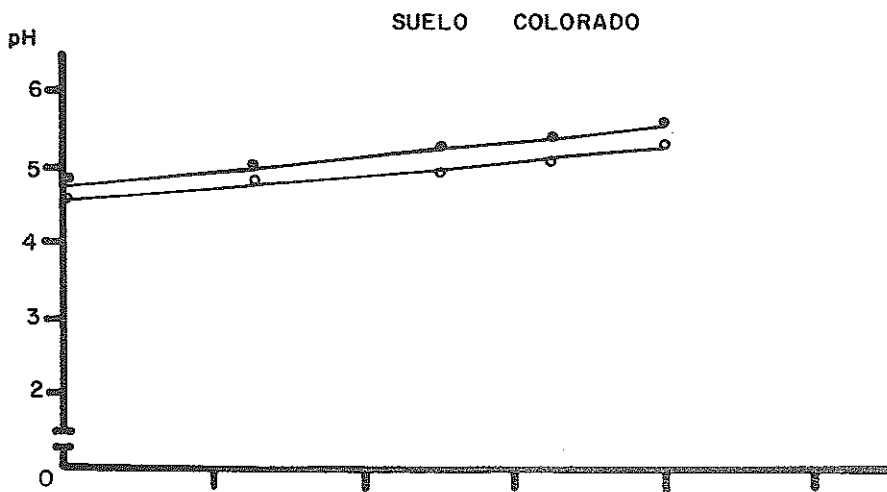


Fig. 1 Influencia de encalado en la reacción del suelo (pH) correspondiente a los dos muestreos.

De acuerdo con los datos reportados por las respectivas ecuaciones de regresión lineal correspondientes a la toma de muestras después de la incubación con cal, se observa que el pH en el suelo Colorado aumenta de 4,8 a 5,6; Instituto de 4,9 a 5,7 y Paraíso de 4,7 a 5,4. Se nota que el encalado calculado para elevar el pH a 6,5, solamente provocó un cambio menor en el pH. Esto coincide con lo observado en Brasil por Amaral et al. (9), quienes encalando el suelo para elevarlo a pH 6,5, obtuvieron un cambio de 4,9 a 5,7. Estos autores suponen que el resultado inferior ocurrió debido a la lixiviación del Ca y Mg a través del perfil del suelo. Igualmente, encontró López (79) en suelos derivados de cenizas volcánicas de Colombia, que la aplicación de cal de 0 a 8 ton/ha variaron el pH del suelo de 5,34 a 5,63. Afirma este autor que el poder tampón de estos suelos es muy grande y que el ion Al, en sus formas de aluminato es responsable de esta mínima variación de acidez.

Con respecto a los resultados después del último corte, en las ecuaciones la regresión lineal que lo representan, se observa que para las tres series de suelo ocurre una disminución del pH del suelo. En la serie Colorado los valores cambiaron de 4,8 a 4,5 en el testigo y de 5,6 a 5,3 en la dosis más alta de encalado, en la serie Instituto los cambios fueron de 4,9 a 4,1 en el testigo, y de 5,7 a 5,0 con el último nivel de cal y en la serie Paraíso los cambios fueron de 4,7 a 4,5 en el testigo y 5,4 a 5,3 en el tratamiento con las dosis más alta de encalado. Esto podría ser explicado por el aumento de acidez causada por fertilizantes aplicados y por la extracción de cationes por las plantas en los dos cortes previos. Estos resultados coinciden con los señalados por varios autores (2, 89, 108, 140) para los suelos tropicales.

Los análisis de los contrastes (Cuadro 5 del Apéndice), muestran que el efecto del encalado es altamente significativo con relación a los cambios de pH, para los suelos estudiados y en las diferentes épocas de muestreo, cuando se compara el testigo con el promedio de los demás tratamientos encalados; tratamiento 2 (3,0 veces la acidez intercambiable) con el tratamiento 4 (dosis de cal para elevar el pH a 6,5) y el tratamiento 1 (1,5 veces la acidez intercambiable) con el promedio de los otros tratamientos con mayores niveles de cal. Esta última comparación indica que la cantidad de cal necesaria para observar cambios significativos de pH es relativamente pequeña, pero los aumentos de pH con el encalado en dichos suelos son insignificantes comparados con las cantidades de cal añadidas al suelo. Según van Raij y Peech (137) y Uehara y Keng (136), este fenómeno se explica a través de la reacción de la cal para neutralizar las cargas eléctricas negativas del suelo.

Los análisis de varianza (Cuadro 6 del Apéndice), indican que hay una influencia altamente significativa del encalado en los valores de pH, cuando se analizaron conjuntamente los tres suelos en las dos épocas de muestreo. Los resultados obtenidos con la prueba de Tukey, aplicado para el estudio de los efectos del encalado en los tres suelos conjuntamente y para las dos épocas de muestreo, muestran que existen muchos tratamientos que difieren significativamente entre sí. En la primera época el tratamiento 4 - Instituto, seguido de los tratamientos 4 - Colorado, 3 - Instituto y 4 - Paraíso, son los más significativamente diferentes comparados con los demás tratamientos con dosis menores de encalado. Para el muestreo final, hubo un cambio brusco en los tratamientos de la serie Instituto, mostrándose inferiores a los tratamientos de las series Colorado y Paraíso.

Los valores de los cambios de pH correspondientes al finalizar cada uno de los tres cortes, se incluyen en el Cuadro 27 del Apéndice, a manera de información puesto que no se discutieron estadísticamente por no considerarlos necesarios.

4.1.1.2 Efecto en la acidez intercambiable

Esta variable también fue estudiada para dos épocas de muestreo, después de la incubación con cal y después del último corte del cultivo.

En el Cuadro 3 del Apéndice, se presentan los resultados analíticos de la acidez intercambiable del suelo correspondiente a cada dosis de encalado para las dos épocas de muestreo. Se observó en dichos cuadros que la variación de la acidez intercambiable corresponde a las dosis crecientes de encalado. Se nota que después de la incubación con cal, la dosis equivalente a 3,0 veces la acidez intercambiable (tratamiento 2) prácticamente neutraliza la acidez intercambiable del suelo. Esta cantidad según Kamprath (73) sería la dosis más correcta para el encalado de los suelos en los trópicos. Estos resultados también fueron encontrados por otros autores (39, 96, 128, 134) como benéficos para rendimientos de los cultivos y sin provocar sobreencalado. Por otra parte, Amadee y Peech (12) reportan que las cantidades de Al extraíble por KCl 1N no representan las propiedades intrínsecas de los suelos ácidos de tipo de Oxisoles.

Se nota que la disminución de H^+ con las dosis de encalado no es tan brusca como la disminución del Al^{+++} . Según Fassbender (42), esto es debido a que la hidrólisis del Al es lenta, conforme cambia el pH del suelo con el encalado.

En la Fig. 2 se representan las dosis de cal y los valores de

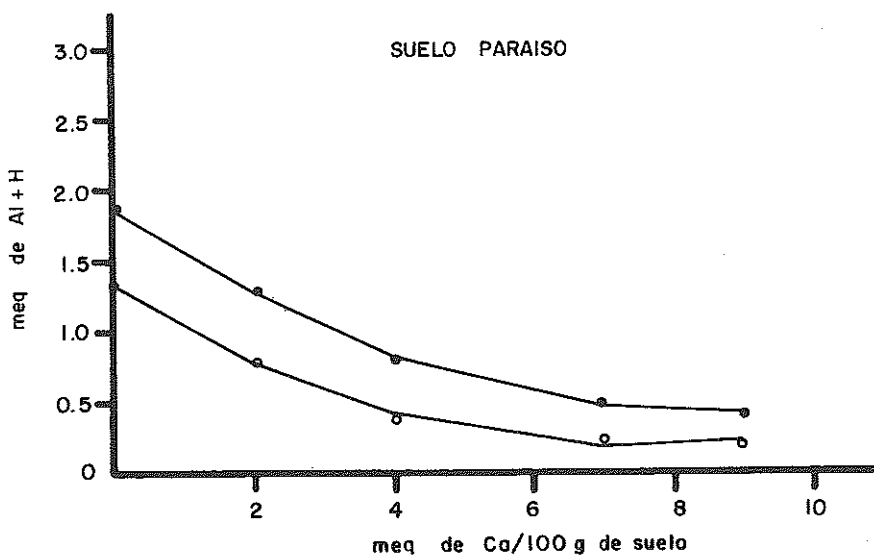
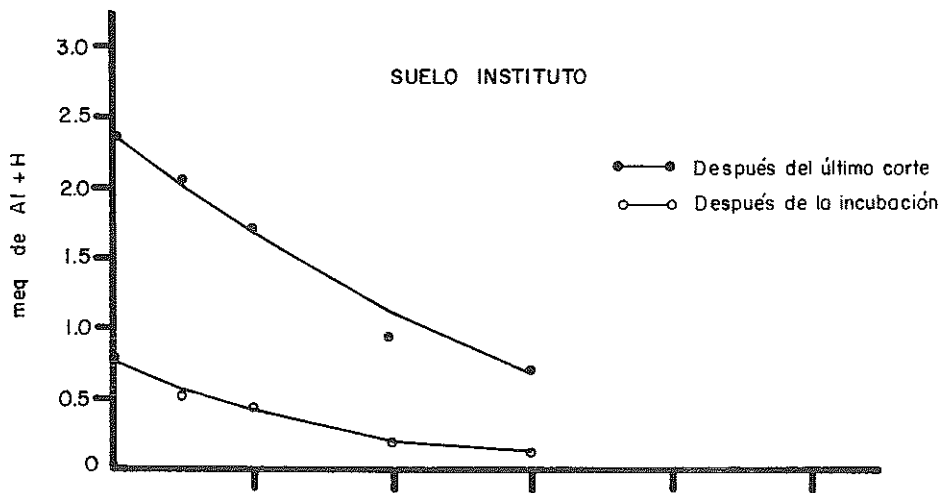
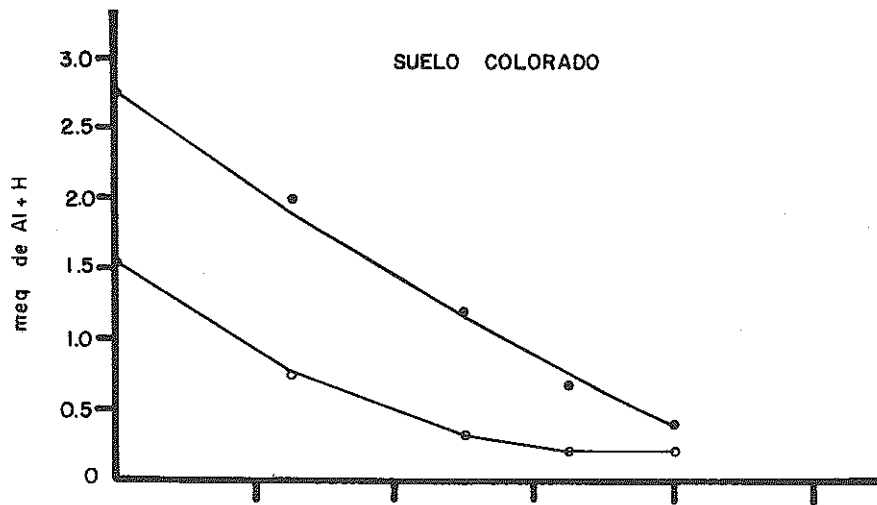


Fig. 2 Influencia del encalado en la acidez del suelo, correspondiente a los dos muestreos.

acidez intercambiable para los suelos Colorado, Instituto y Paraíso en las diferentes épocas de muestreo del suelo. En dicha figura, se observa una correlación negativa altamente significativa entre la acidez intercambiable y el pH del suelo. Este fenómeno concuerda con el encontrado por Rixon y Sherman (117) en suelos derivados de cenizas volcánicas en Hawai.

En las respectivas ecuaciones de regresión cuadrática, para después de la incubación con cal, se observa que los valores de la acidez intercambiable en la serie Colorado, tienden a disminuir de 1,57 a 0,19 meq/100 g de suelo, en la serie Instituto de 0,83 a 0,13 meq/100 g y en la serie Paraíso de 1,31 a 0,20 meq/100 g, al aumentar las dosis de cal aplicadas. Estos resultados concuerdan con los encontrados por muchos autores (5, 39, 128, 130).

Según los resultados obtenidos en el muestreo final, las ecuaciones de regresión cuadrática muestran una tendencia semejante a la anterior, pero en este caso dichos valores indican cantidades mayores de acidez intercambiable. En la serie Colorado, tienden a disminuir los datos de 2,70 a 0,44 meq/100 g, en la serie Instituto de 2,25 a 0,73 y en la serie Paraíso de 1,88 a 0,42 meq/100 g. Estos valores indican que hay un aumento considerable en la acidez del suelo en relación a las dos épocas de muestreo, mayormente en la serie Instituto (0,83 a 2,25 meq/100 g en el testigo). Según varios autores (2, 89, 108, 140) esto puede ser ocasionado por uso de fertilizantes ácidos y/o por la capacidad de reemplazo de Al intercambiable (31, 95).

Los análisis de los contrastes (Cuadro 7 del Apéndice), muestran una influencia altamente significativa del encalado sobre la acidez intercambiable en todos los suelos y en las diferentes épocas de muestreo,

cuando se compara el testigo con el promedio de los otros tratamientos encalados; tratamiento 1 dosis mínima de cal con el promedio de los otros tratamientos con dosis más altas de encalado y el tratamiento 2, segundo nivel de cal con el tratamiento con dosis más alta.

De acuerdo con los análisis de varianza (Cuadro 6 del Apéndice) realizados para observar la influencia del encalado sobre la acidez intercambiable en los tres suelos conjuntamente, se nota una respuesta altamente significativa correspondientes a las dosis crecientes de encalado.

Los resultados obtenidos en la prueba de Tukey, analizando los suelos conjuntamente, indican diferencias significativas entre muchos tratamientos. Se nota que después de la incubación con cal el tratamiento 0 - Colorado (1,57 meq/100 g) seguido por los tratamientos 0 - Paraíso (1,31 meq/100 g) y 0 - Instituto (0,83 meq/100 g) son los más diferentes significativamente, comparados con los otros tratamientos encalados. Sin embargo, en el muestreo final, los más diferentes significativamente son 0 - Colorado (2,70 meq), 0 - Instituto (2,25 meq) y 1 - Instituto (2,13 meq). Dichos valores coinciden con las disminuciones de pH observado también en el muestreo final, destacadamente en el suelo Instituto que cambia de 4,9 a 4,1 en el testigo.

4.1.2 Efecto en el punto de carga cero (ZPC)

En los Cuadros 8, 9 y 10 en el Apéndice, se presentan los resultados de las titulaciones potenciométricas, con muestras de suelo equilibradas por 72 horas.

En las Figuras 3, 4 y 5 se representan las curvas de titulación de los suelos. El punto de intersección de las curvas indica el pH

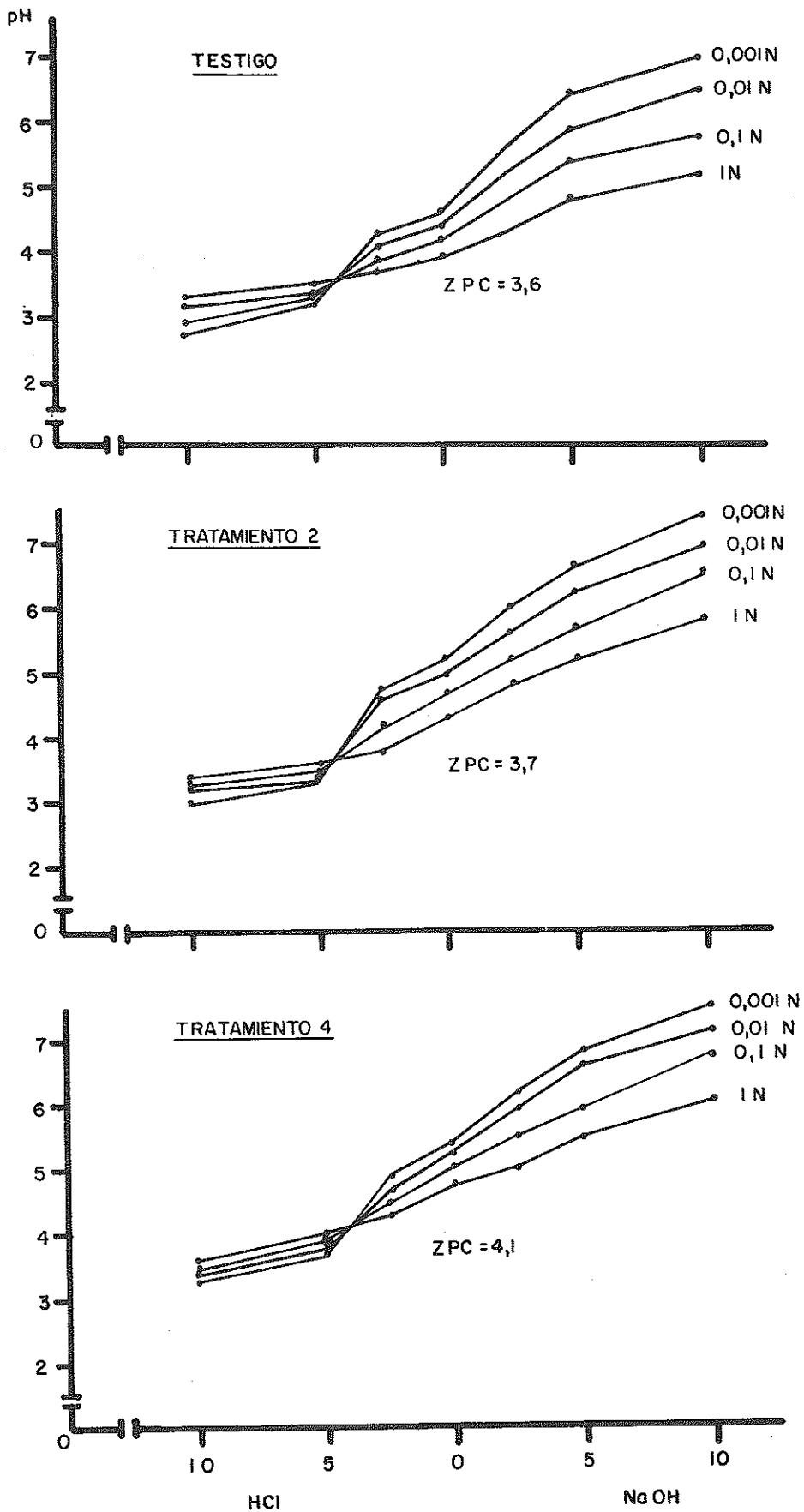


Fig. 3 Curva de titulación potenciométrica en diferentes concentraciones de NaCl y determinación del ZPC, suelo Colorado.

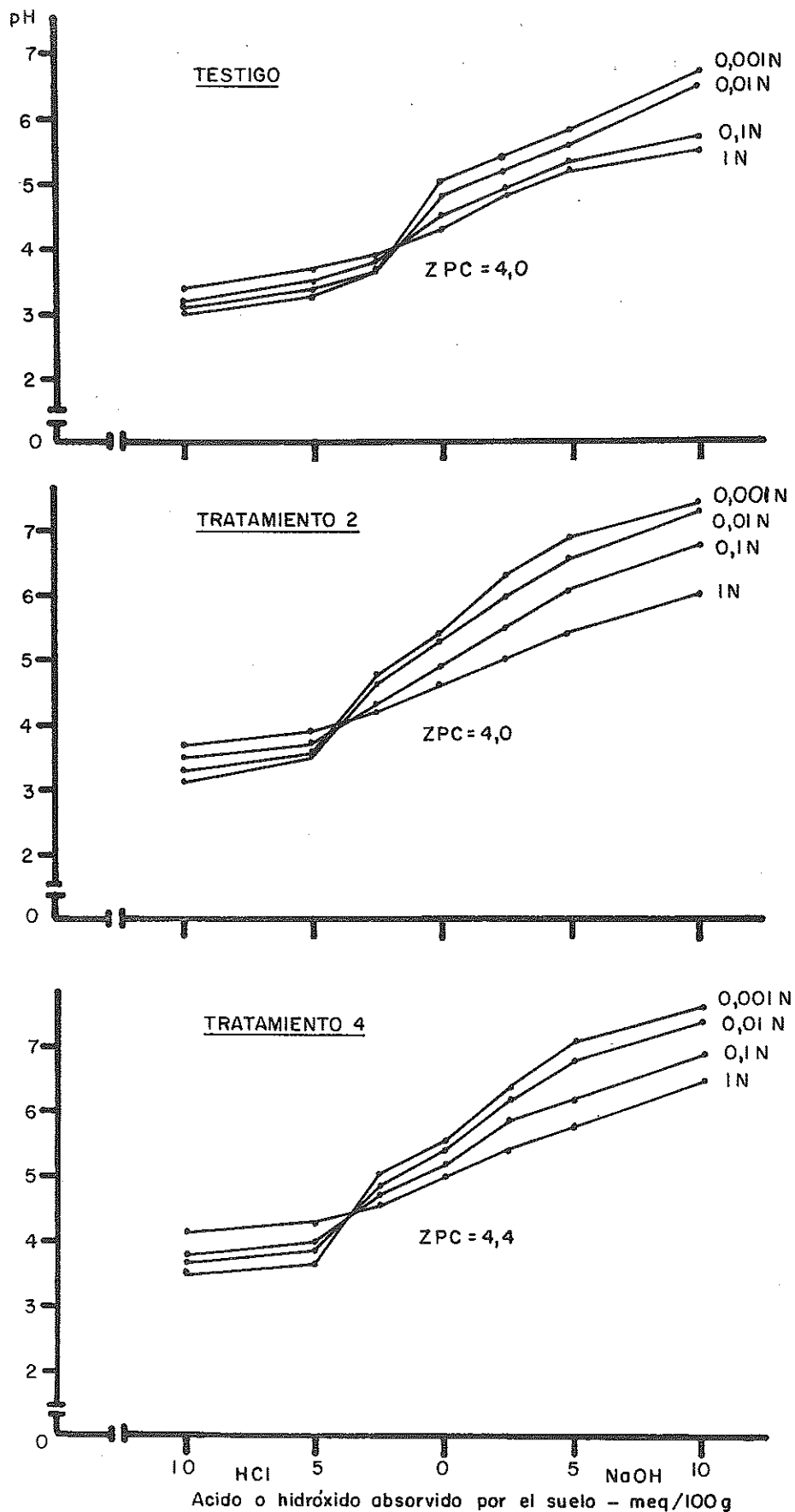


Fig. 4 Curva de titulación potenciométrica en diferentes concentraciones de NaCl y determinación de ZPC, suelo Instituto.

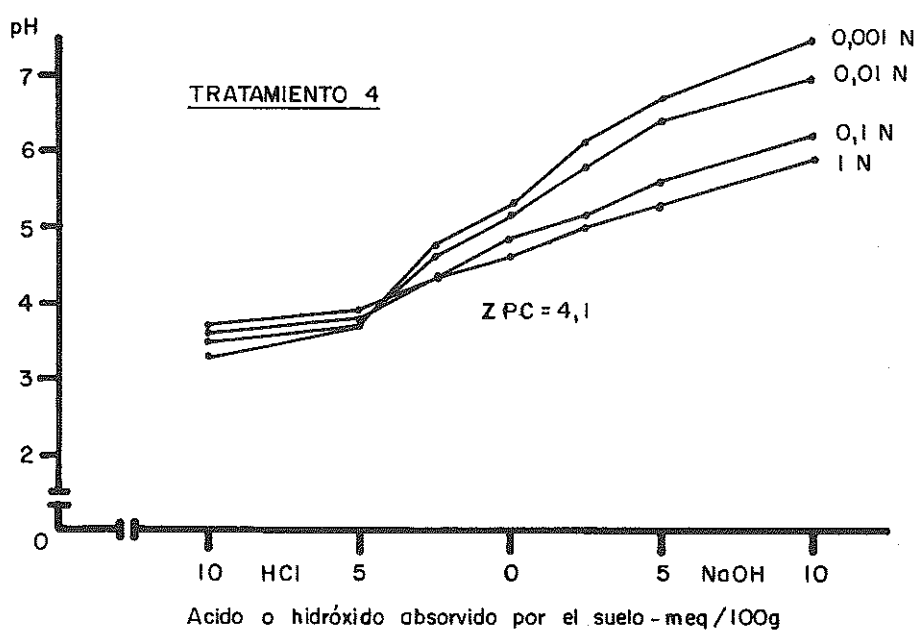
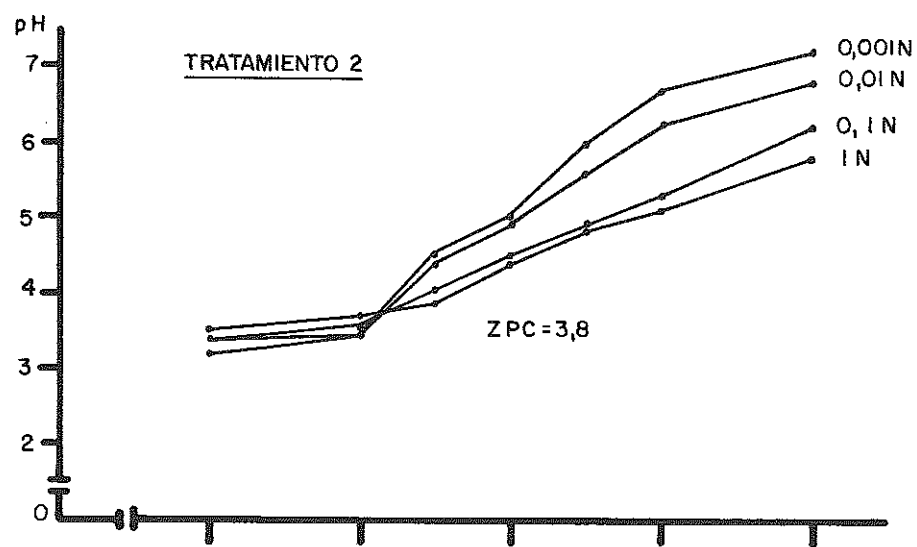
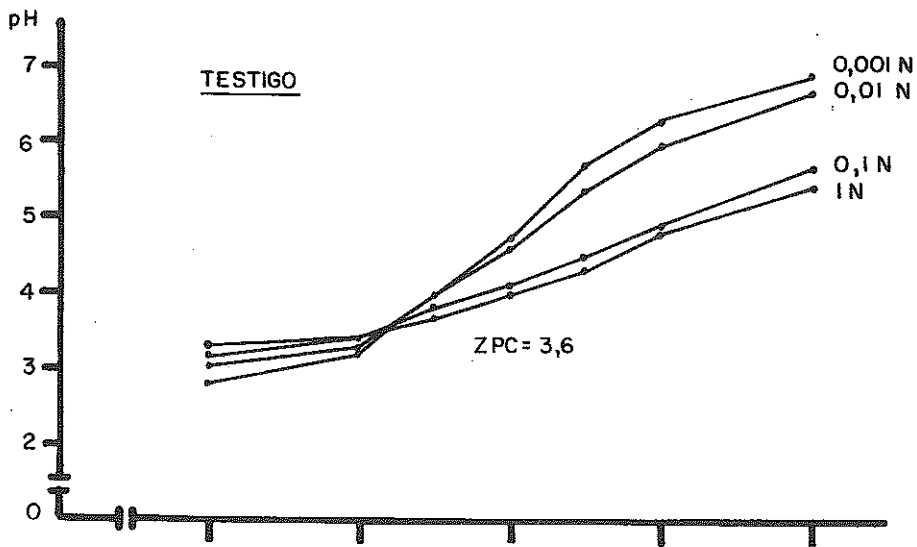


Fig. 5 Curva de titulación potenciométrica en diferentes concentraciones de NaCl y determinación del ZPC, suelo Paraíso.

del ZPC, que refleja la condición de igualdad de absorción de H^+ y OH^- por corresponder a un potencial donde la carga es igual a cero.

En casi todas las muestras de suelo el ZPC se encuentra al mismo valor que el pH medido en KCl 1N. Uehara y Keng (136) han reportado que tales suelos por esta razón tienen baja afinidad para iones monovalentes como NH_4^+ ó Cl^- y en este caso es más fácil las pérdidas de abono con estos iones por lixiviación. Así, podrá resultar práctico aplicar K en forma fraccionada como se acostumbra para los abonos nitrogenados.

Para algunos tratamientos, existe una incertidumbre en la posición exacta del ZPC, dentro de algunos décimos de pH. El mismo problema fue observado por Parks (106) y van Raij y Peech (137). Según van Raij y Peech (137) las curvas no interceptan en el cero de titulación debido al Al intercambiable en las muestras equilibradas del suelo.

De acuerdo con los valores obtenidos para el ZPC (Figs. 3, 4 y 5), se puede afirmar que para todos los tratamientos, su valor se encuentra por debajo del pH del suelo, de manera que, dichos suelos presentan cargas negativas, por lo tanto, será intercambiador de cationes y el pH en KCl 1N será más bajo que el pH en H_2O . Esto coincide con los resultados y es similar a lo encontrado por van Raij y Peech (137) en Oxisoles y Alfisoles de Brasil.

Se nota que el ZPC cambia muy poco con las dosis de encalado para los tres suelos. Para el suelo Colorado el cambio pH del ZPC del testigo al tratamiento 2 hay de 0,2 unidades de diferencia de pH y para el tratamiento 4 existe hasta 0,7 unidades de variación. Para el suelo Instituto el cambio del testigo al tratamiento 2 es de 0,2 unidades y para el tratamiento 4 es de 0,4 unidades. Para el suelo Paraíso, los

cambios son de 0,1 y 0,4 unidades entre el testigo y los otros dos tratamientos encalados. Se nota una mayor influencia del encalado en el cambio del ZPC que en el suelo Colorado (3,5 a 4,2).

Se observa también que el pH del ZPC para el testigo del suelo Colorado es más bajo (3,5) que para el suelo Paraíso (3,7) y suelo Instituto (4,0). Comparando las muestras del segundo tratamiento se observa la misma tendencia; suelo Colorado (3,7), suelo Paraíso (3,8) y suelo Instituto (4,2). Sin embargo, cuando se compara los tratamientos 4, el más bajo pH de ZPC es del suelo Paraíso (4,1), seguido del Colorado (4,2) y finalmente suelo Instituto (4,4).

4.1.3 Efecto en las cargas eléctricas del suelo

Se determinó las cargas eléctricas del suelo por medio de medición directa de las cargas positivas y negativas absorbidas, correspondientes a diferentes pH del suelo y a diferentes concentraciones de electrolitos.

En el Cuadro 11 del Apéndice, se presentan las cargas eléctricas de las muestras de los tres tratamientos escogidos, determinados por absorción de Na^+ y Cl^- desplazados por soluciones de NaCl 0,1 y 0,2 N respectivamente.

Los resultados (Cuadro 11) muestran que ambas cargas positivas y negativas coexisten en estos suelos. La carga neta fue determinada por la diferencia entre las cargas opuestas.

Se observa que la disminución de la concentración del electrolito, disminuye la magnitud de ambas cargas positivas y negativas en el sistema. Esto coincide con el reportado por los trabajos de El-Swaify (36), Sumner y Davidts (132) y van Raij y Peech (137). Según van Raij

y Peech (137) tal disminución en la superficie de carga negativa y positiva con la disminución de la concentración del electrolito están de acuerdo con la teoría de la capa doble para interfases reversibles y puede ser en parte debido al mutuo cancelamiento de cargas adyacentes opuestas, cuando la distancia de separación de las cargas de cambio inferior que $1/K$ (el grosor de la atmósfera iónica).

Se observa que para el testigo de todos los tres suelos hay predominio de cargas netas positivas, pero en los tratamientos que fueron encalados predominan las cargas netas negativas, excepto en el tratamiento 2 en la solución 0,1 N de NaCl. De esta manera, la mayoría de la cal se gastó en el desarrollo de cargas negativas. Las cargas negativas a su vez son balanceadas por iones Ca en el sitio donde la cal fue aplicada y por consiguiente, muy poca cal aplicada pasa al subsuelo (136). Esta observación coincide con los datos de Bornemisza et al. (19), para el suelo Colorado y explica la alta capacidad tampón observado por la misma.

En los Cuadros 12 y 13 del Apéndice, se presentan los valores de las cargas eléctricas obtenidas por medición de absorción de iones en las soluciones de CaCl_2 0,1 y 0,01 N, y MgSO_4 0,01 y 0,001 N. Todavía una comparación de los resultados no es posible, como indica van Raij y Peech (137) y El-Swaify (36).

De los resultados obtenidos para la magnitud de las cargas eléctricas del suelo con uso de diferentes concentraciones de electrolitos, se puede verificar que la extracción de los iones con CaCl_2 0,1 N sin lavado del exceso del electrolito, representa la real condición de intercambio del suelo con cargas variables.

En general, las cargas positivas y negativas y las cargas netas

determinadas para estos iones divalentes son más altos que aquellos obtenidos con NaCl, aún cuando ambos, el catión y el anión, son divalentes. Estos datos coinciden con los obtenidos por van Raij y Peech (137). Según Fassbender (42), estas observaciones son consistentes con la teoría de un aumento del diámetro del ión y la disminución de su agua de hidratación.

4.1.4 Efecto en la absorción de nutrimentos

En los Cuadros 24, 25 y 26 del Apéndice, se observan los efectos del encalado en la absorción de P, K, Ca y Mg, después del primer, segundo y tercer corte de sorgo, respectivamente. Dados los objetivos del presente estudio discutiremos únicamente el efecto sobre la absorción del fósforo.

4.1.4.1 Efecto en la absorción de fósforo

Los resultados de absorción de fósforo están indicados en el Cuadro 14 del Apéndice. Se observa de estos resultados que la absorción de fósforo aumenta hasta un máximo con las dosis de encalado, variando este máximo entre los suelos y en los cortes, para disminuir ligeramente hasta las dosis máximas de cal.

En las Figuras 6 y 7, se representan las dosis de cal y los valores de la absorción de fósforo por el cultivo en los tres suelos estudiados en función de los tres cortes. Dichas figuras muestran tendencias de incremento para los primeros niveles del encalado para luego disminuir a medida que se aumenta la dosis. Estos resultados coinciden con los encontrados por varios autores (40, 41, 46, 85, 104).

Las ecuaciones de regresión cuadrática para el primer corte indican (Cuadro 15 del Apéndice) un incremento de la absorción de fósforo

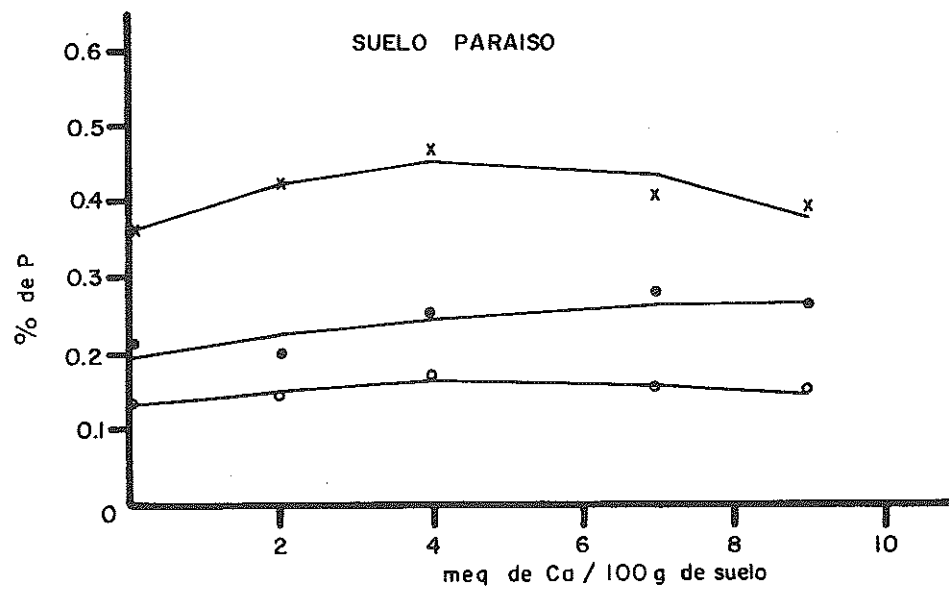
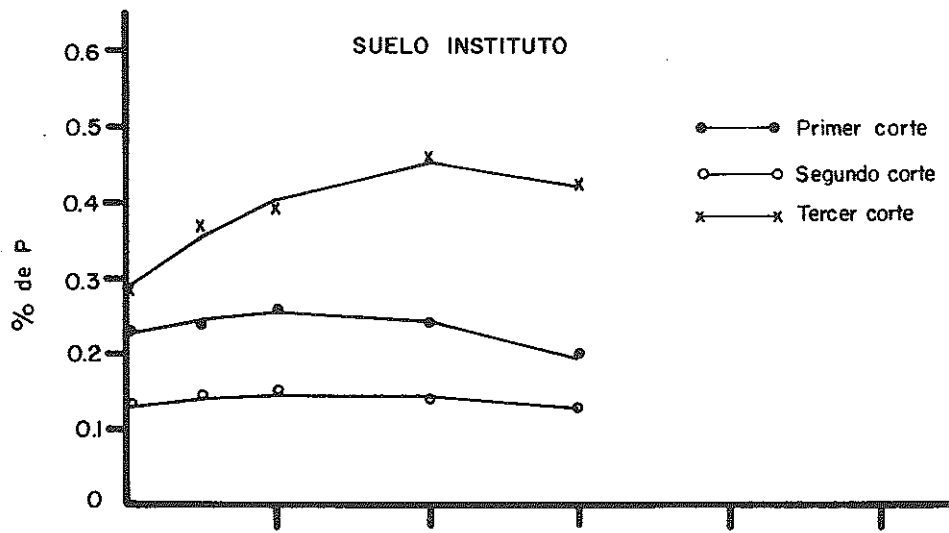
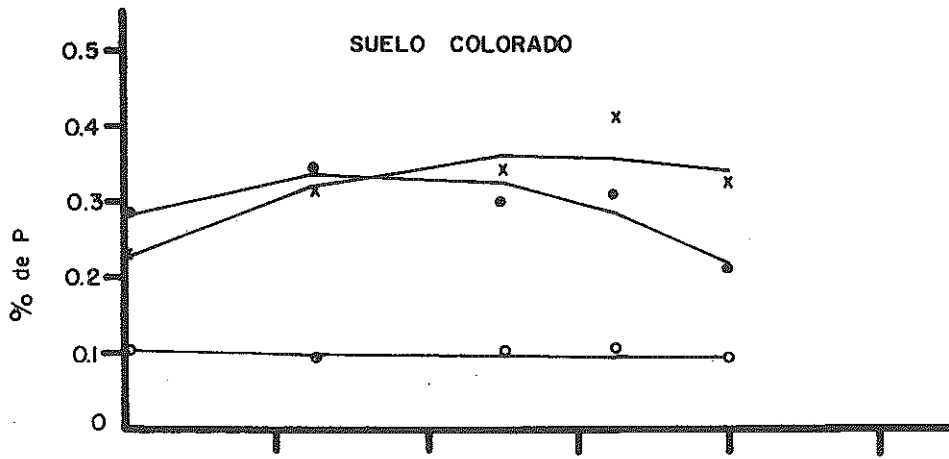


Fig. 6 Influencia del encalado en la absorción de fósforo por las plantas correspondiente a los tres cortes.

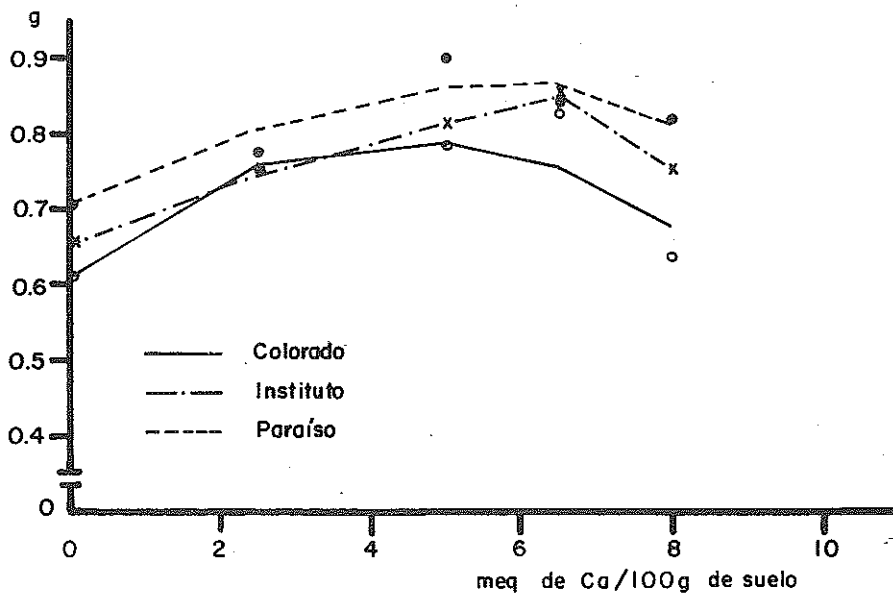


Fig. 7 Influencia del encalado en la absorción de fósforo por las plantas correspondientes a la suma de los tres cortes de cultivo.

de 0,28 a 0,35 por ciento, en el caso del primer nivel de cal (pH 5,2), para la serie Colorado; para la serie Instituto, el incremento es de 0,24 a 0,26 por ciento y llega hasta el segundo nivel de cal (pH 5,2) y para la serie Paraíso el incremento es de 0,21 a 0,28 por ciento llegando hasta el tercer nivel de cal (pH 5,3). Después de ese nivel de absorción de fósforo decae al llegar hasta el valor máximo de las dosis de encalado. Este decaimiento es más abrupto para la serie Colorado.

Las correspondientes ecuaciones de regresión cuadrática para el segundo corte nos muestran un ligero decaimiento de la absorción de fósforo en los tres suelos estudiados. Se nota que la absorción de fósforo disminuyó mucho con relación a los otros cortes. Este fenómeno se explica por la disminución de fósforo en los suelos, debido a que después del primer corte no se repitió la fertilización fosfatada.

En las ecuaciones de regresión cuadrática que representan al tercer corte, se observan tendencias semejantes al primero en la absorción de fósforo, para los tres suelos estudiados. El Colorado, tiende a incrementar de 0,23 a 0,41 por ciento a partir de la primera dosis de encalado hasta el tercer nivel para luego disminuir hasta 0,33 por ciento en caso de la última dosis. En cambio para la serie Instituto, la absorción de fósforo se incrementa de 0,28 a 0,47 por ciento hasta el tercer nivel de encalado para luego disminuir para 0,42 por ciento en el último nivel. En la serie Paraíso, tiende a incrementarse de 0,37 a 0,48 por ciento, hasta el segundo nivel de encalado, para posteriormente disminuir hasta 0,40 por ciento en la dosis máxima.

En las ecuaciones de regresión cuadrática, considerando la suma de los valores de la absorción de fósforo, se observan tendencias de incrementar la absorción de fósforo, hasta los niveles intermedios de

cal, para posteriormente disminuir en las dosis más altas.

Al considerar los valores de pH correspondientes a dosis de encalado se puede explicar, en forma preliminar, el efecto diferente del encalado en la absorción de fósforo. Los valores iniciales de pH son de 4,8; 4,9 y 4,7 para los suelos Colorado, Instituto y Paraíso, respectivamente. Los cambios de estos valores a través del encalado son crecientes, hasta alcanzar valores de 5,6; 5,7 y 5,4 para los suelos Colorado, Instituto y Paraíso. Esto coincide con los resultados obtenidos por Fox et al. (46) en el cual concluyen que el nivel óptimo de pH, está entre 5,0 y 6,0. Asimismo, se obtuvo una máxima de absorción de fósforo, en varias plantas a un pH alrededor de 5,6 a 5,7.

De acuerdo con los análisis de varianza (Cuadro 16 del Apéndice), se observa que hay diferencias altamente significativas entre los tratamientos referentes a la absorción de fósforo en los tres cortes de la parte aérea de las plantas.

Considerando conjuntamente los tres suelos, en forma general, se puede indicar que la absorción óptima de fósforo se obtiene a un pH entre 5,2 y 5,4. Estos valores difieren muy poco de los encontrados por Fox et al. (46) en suelos de Hawai, por Fassbender y Molina (41) en suelos de Costa Rica, por Abruña et al. (5) en Puerto Rico y por Brams (21) en Oeste de Africa, aunque son menores que los que se consideran para suelos de clima templado.

4.1.5 Efecto en la producción de materia seca

El efecto del encalado sobre la producción de materia seca se refleja en los tres cortes del cultivo.

En el Cuadro 18 del Apéndice, se presentan los resultados de la

producción de materia seca, en los suelos Colorado, Instituto y Paraíso, correspondientes a los tres cortes del cultivo.

En las Figuras 8, 9 y 10, se representan la producción de materia seca del cultivo durante los tres cortes y la suma de los tres cortes en los diferentes tratamientos. Se observa que hay una tendencia muy semejante en los tres suelos en la producción de materia seca con el encalado. Se verifica que, en general, hay una tendencia a incrementar la biomasa con el encalado para luego bajar en las dosis más altas. Estas observaciones confirman la necesidad del encalado a niveles moderados en los tres suelos estudiados y advierten el peligro de un sobreencalado.

En las Figuras 11 y 12, se presentan las dosis de cal y la producción de materia seca para los tres suelos en los tres cortes y en la suma total de materia seca.

De acuerdo con las ecuaciones de regresión gamma (Cuadro 19 del Apéndice), en el primer corte se observa que la producción de materia seca en el suelo Colorado, tiende a incrementar de 21,8 g a 26,0 g hasta la dosis de 2,5 meq de Ca/100 g de suelo (primer nivel de cal) para luego disminuir en las dosis 5,0 meq de Ca/100 g (segundo nivel de cal) para posteriormente subir en la dosis 8,0 meq de Ca/100 g (dosis más alta de cal), indicando que hasta esta dosis no hubo efecto detrimental del sobreencalado, como verificaron otros autores (19, 78). Soares et al. (128) observaron que el rendimiento de maíz y de *Stylosanthes guyanensis*, tendrían a disminuir ligeramente, comparando las tasas de 5 y 10 ton/ha de cal aplicada al suelo.

En la serie Instituto los valores bajan al primer nivel de cal

Rendimiento de materia seca (g/maceta) después de tres cortes del sorgo

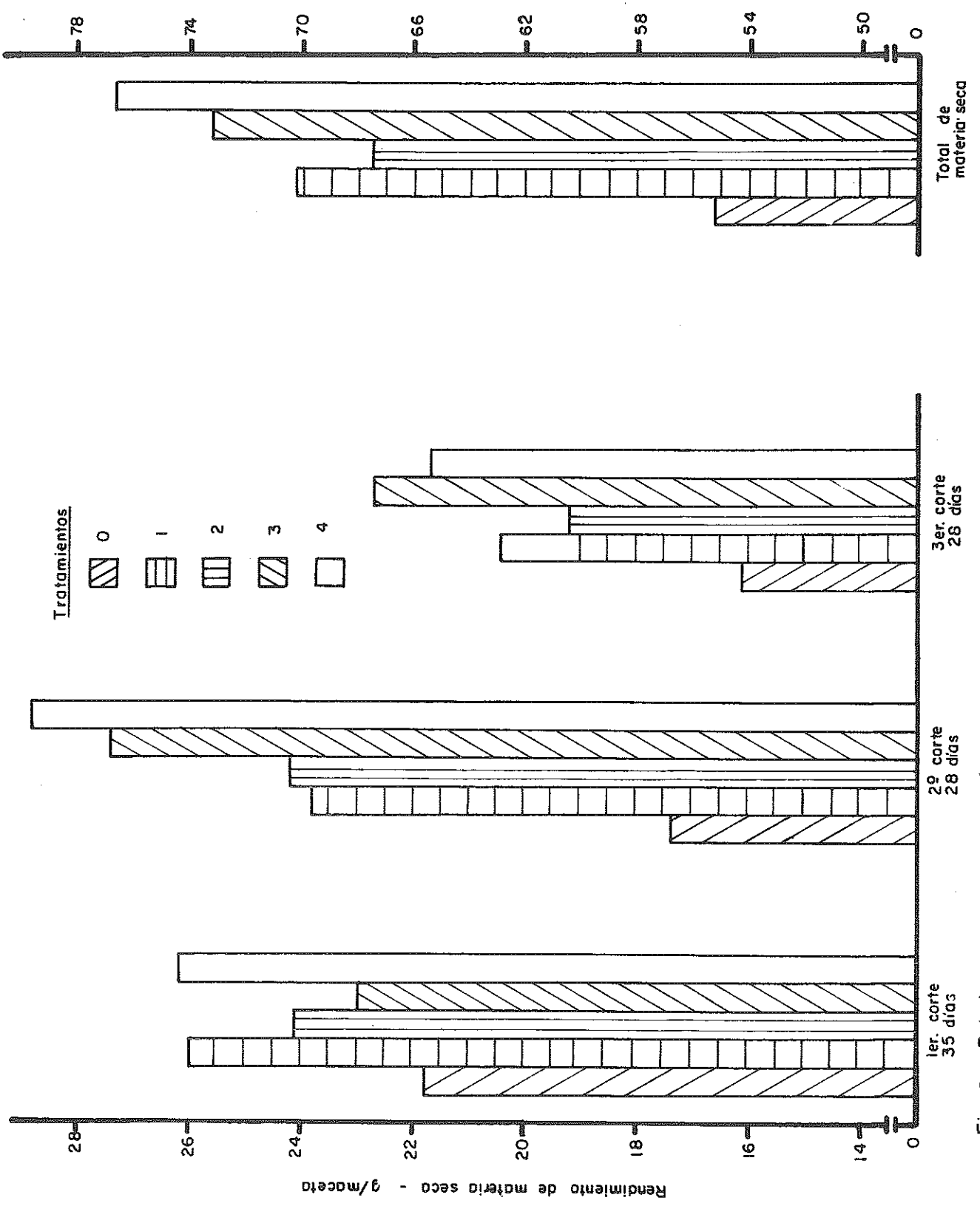


Fig. 8 Relaciones entre la producción de materia seca (70°C) de varios cortes del cultivo de sorgo y las tasas de caliza en el Suelo Colorado

Tratamientos

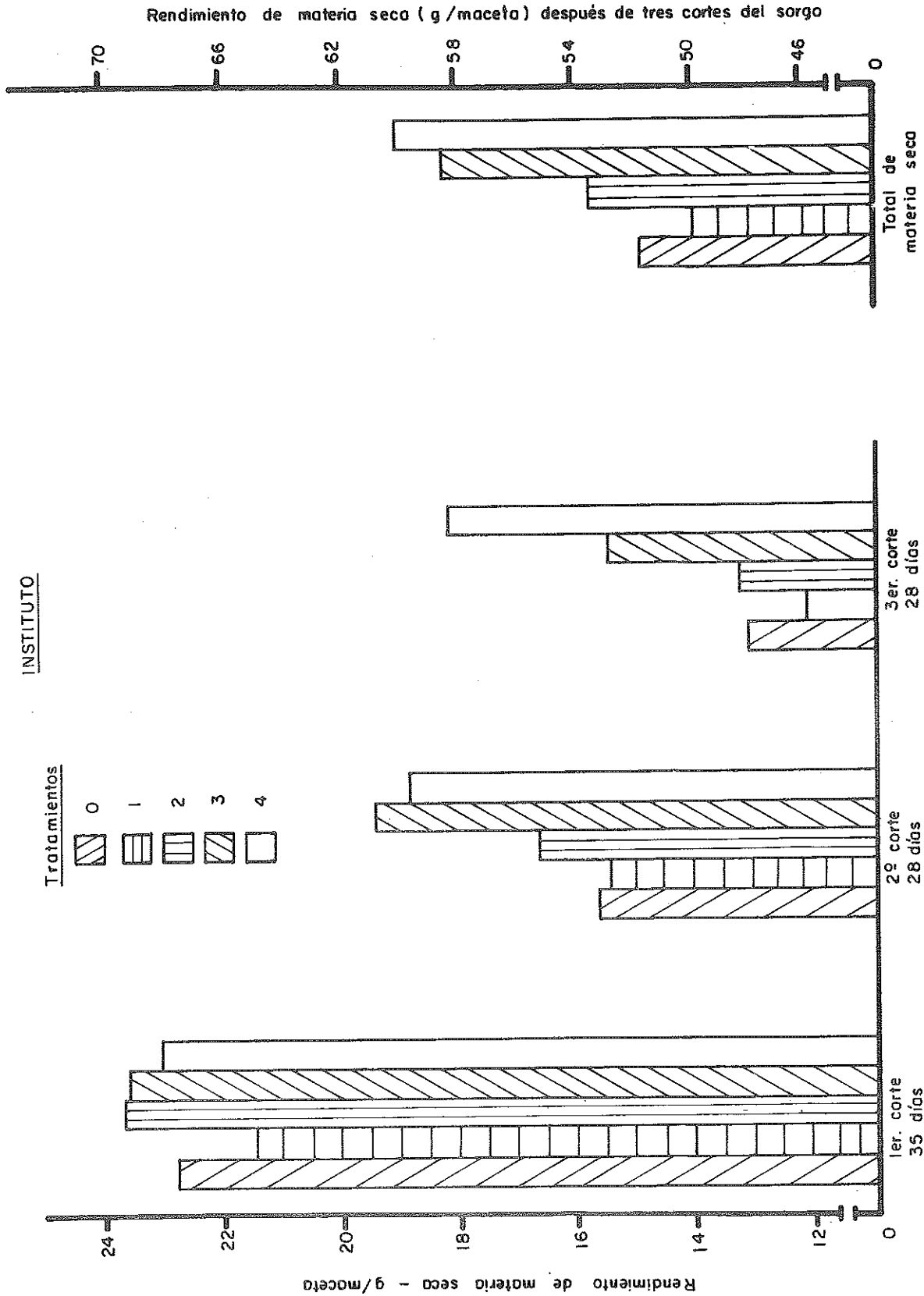
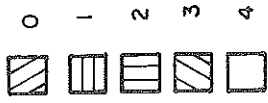


Fig. 9 Relaciones entre la producción de materia seca (70°C) de varios cortes del cultivo de sorgo y las tasas de caliza en el Suelo Instituto

P. A. RAISO

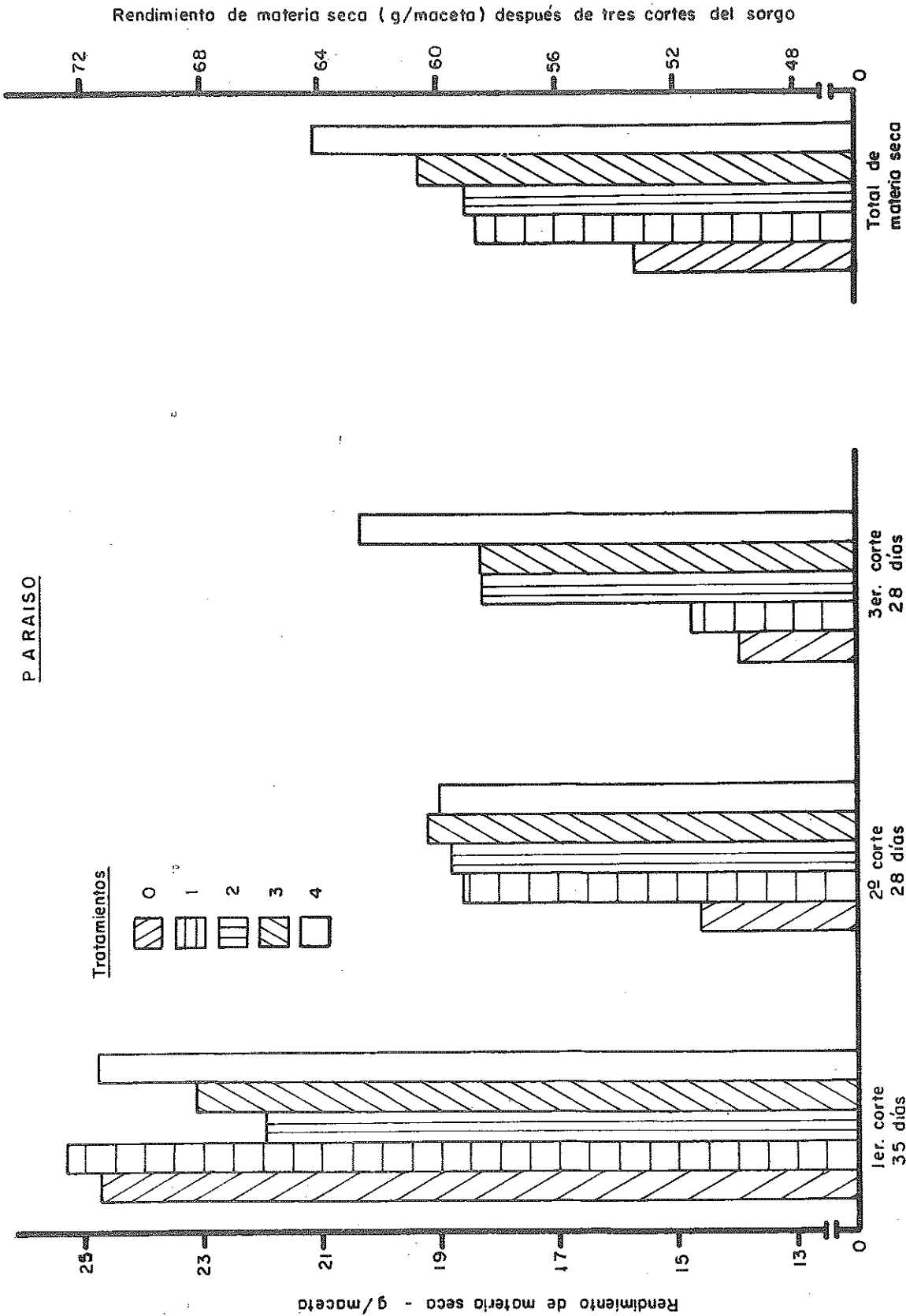


Fig.10 Relaciones entre la producción de materia seca (70°C) de varios cortes del cultivo de sorgo y las tasas de caliza en el Suelo Paraiso

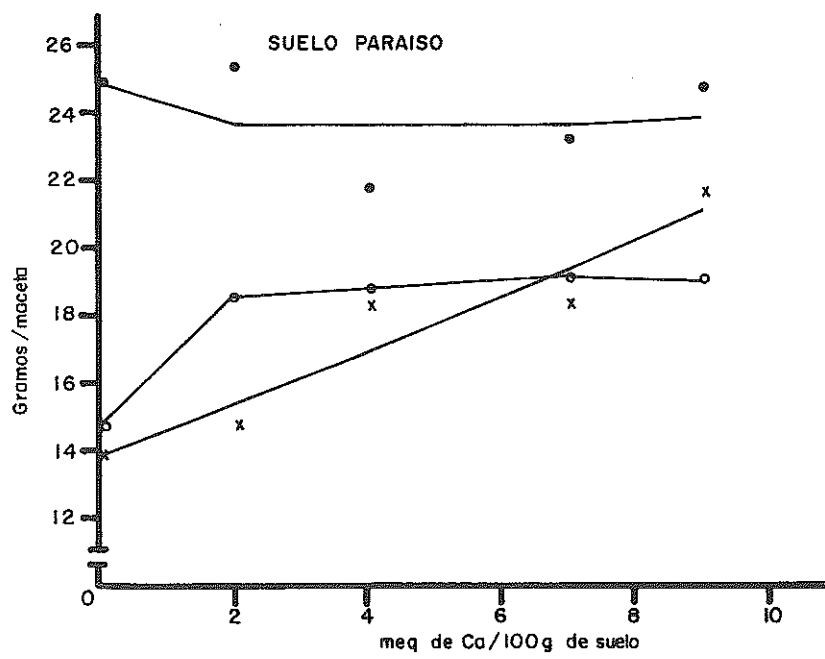
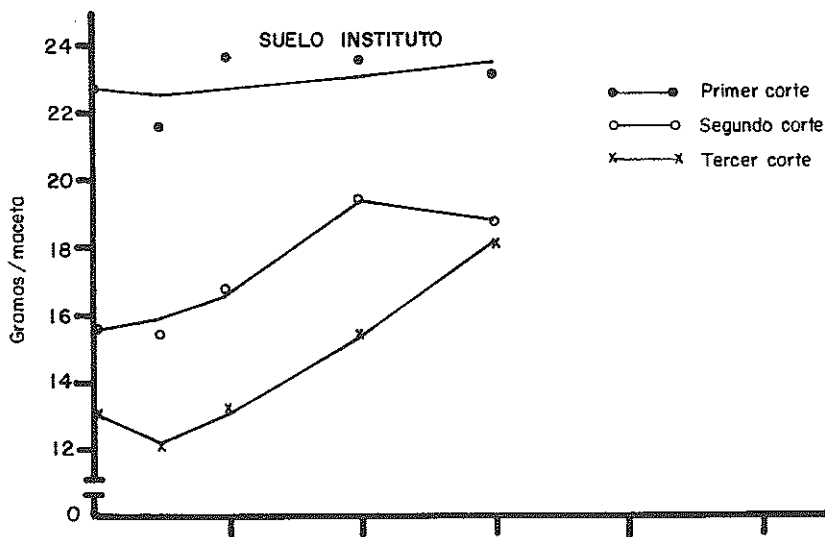
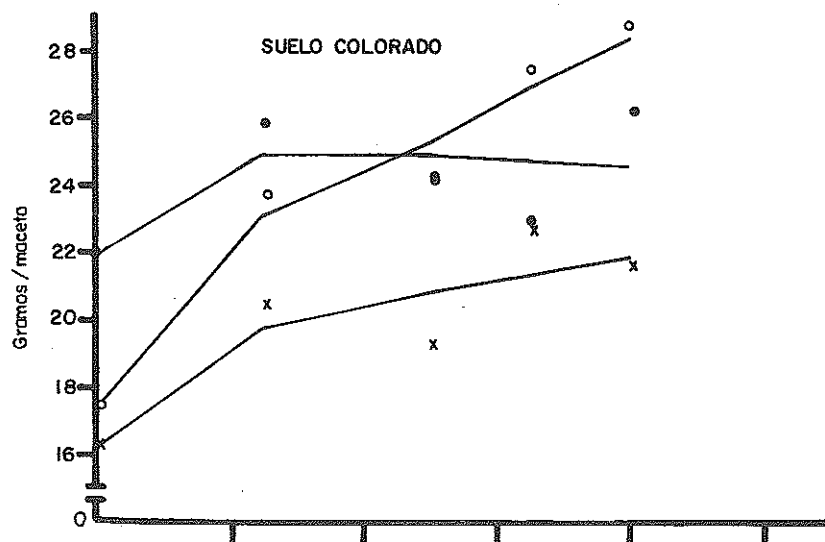


Fig. 11 Influencia del encalado en la producción de materia seca correspondiente a los tres cortes del cultivo

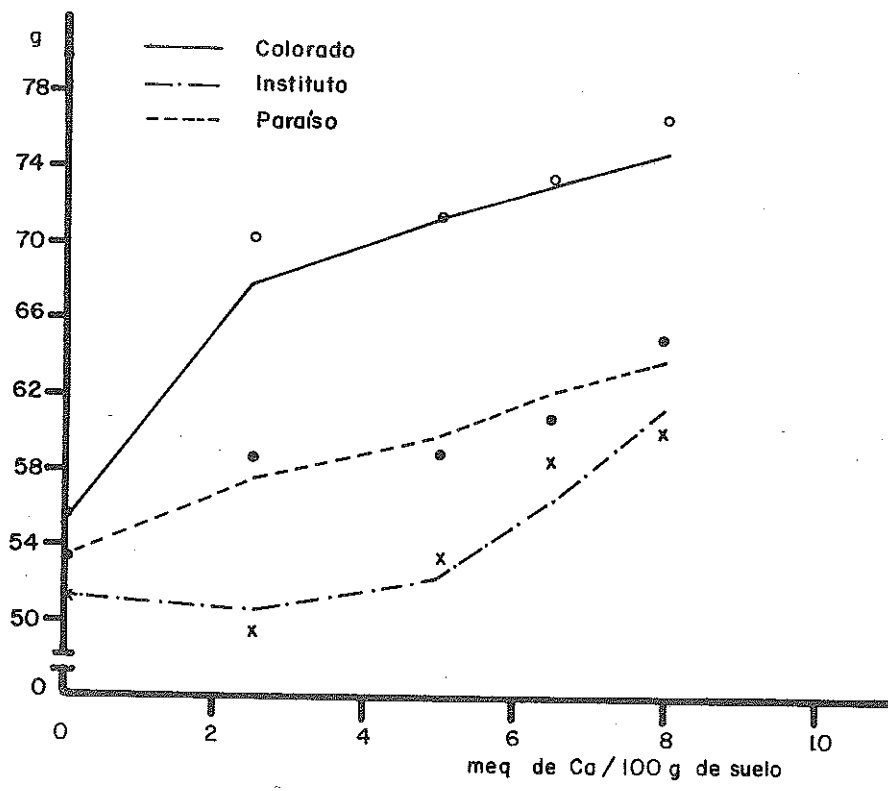


Fig.12 influencia del encalado en la producción de materia seca correspondiente a la suma de los tres cortes del cultivo.

de 22,8 a 21,5 g, pero posteriormente tienden a incrementar según las dosis crecientes de cal y permanecen más o menos constantes.

En la serie Paraíso, se observa que la biomasa seca tiende a incrementar de 24,8 a 25,3 g para el primer nivel de cal, para luego disminuir en el segundo nivel de cal para 22,0g y posteriormente incrementarse a dosis más altas de encalado, pero nunca alcanzan producciones superiores al primer nivel de cal, indicando que la dosis mínima de cal fue suficiente para aumentar la producción de sorgo.

Las ecuaciones de regresión gamma para el segundo corte, indican que la producción de materia seca en la serie Colorado, tienden a aumentar de 17,4 a 28,8 g con las dosis crecientes de encalado. En la serie Instituto, tienden a disminuir ligeramente de 15,6 a 15,4 g para el primer nivel de cal para luego incrementarse hasta 19,4 g en el tercer nivel de cal y posteriormente disminuye a 18,8 g el último nivel de cal, mostrando una pequeña tendencia detrimental del sobreencalado.

En la serie Paraíso, la producción de materia seca, tiende a aumentar notablemente en el primer nivel de cal de 14,6 a 18,6 g para posteriormente mantenerse casi constante, luego empieza a disminuir ligeramente de 19,2 a 19,0 g para el último nivel de cal, indicando inicios de efecto negativo de la cantidad correspondiente,

Las ecuaciones de regresión gamma correspondiente al tercer corte, muestran que la producción de materia seca en la serie Colorado tienden a incrementarse de 16,1 a 20,4 g hasta el primer nivel de cal para posteriormente disminuir en el segundo nivel y luego aumentar en los niveles siguientes de encalado.

En la serie Instituto sigue la misma tendencia de disminuir la

materia seca en el primer nivel de encalado para posteriormente incrementarse con las dosis crecientes de cal. En la serie Paraíso, se observa un incremento según se aumentan las dosis de encalado, pero en este corte el aumento más significativo corresponde al segundo nivel de cal (4,0 meq de Ca).

Las ecuaciones de regresión gamma correspondiente a la suma de la producción de materia seca en los tres cortes, muestran una tendencia lineal significativa asociada al encalado en las series Colorado y Paraíso. En la serie Instituto, se observa una ligera disminución en el incremento hasta el primer nivel de cal para posteriormente seguir la tendencia lineal con el aumento de las dosis de encalado.

Las tendencias indican una mayor producción de materia seca, hacia niveles intermedios de encalado. A concentraciones mayores que estos niveles, disminuye la biomasa. Estos hechos concuerdan con los encontrados por otros autores (19, 40, 41, 78) en Costa Rica y demás países de las regiones tropicales.

Los análisis de los contrastes (Cuadro 20 del Apéndice), muestran una respuesta altamente significativa del encalado en producción de materia en el suelo Colorado correspondiente al segundo, tercer y en la suma total de los cortes. Cuando se compara el testigo con el promedio de los tratamientos encalados, para el primer corte esta respuesta fue significativa. Las otras comparaciones en general no indican respuestas significativas, excepto cuando se compara el tratamiento 2 con el tratamiento 4 en el segundo, tercer y en la suma de los tres cortes.

Para el suelo Instituto, solamente se observa respuesta significativa al encalado, cuando se compara el tratamiento 2 con el tratamiento

4; y el tratamiento 1 con el promedio de los otros tratamientos encalados en el tercer corte y en la suma de los tres cortes. Esta respuesta menor coincide con el grado de acidez lineal de este suelo y su menor contenido de Al intercambiable. En la serie Paraíso, se nota que hay respuestas significativas al encalado, cuando se compara el testigo con el promedio de los tratamientos en el segundo, tercer corte y en la suma de los mismos. También se puede observar diferencias significativas entre las comparaciones entre el tratamiento 2 y el tratamiento 4; el tratamiento 1 con el promedio de los tratamientos encalados, en el tercer corte; y el tratamiento 2 con el tratamiento 4 en la suma de los tres cortes.

De acuerdo con los análisis de varianza (Cuadro 21 del Apéndice), se observa que hay diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en el primer corte, mientras que para el segundo y tercer corte las diferencias son altamente significativas. Se supone que esta diferencia en los cortes se debe al tiempo de incubación con cal (30 días) que fue insuficiente para la neutralización de la acidez del suelo.

Los resultados encontrados en la prueba de Tukey comparando los tres suelos conjuntamente, indican que no hay respuesta significativa del encalado en la producción de materia seca en el primer corte. Mientras tanto, indican que hay tratamientos significativamente diferentes entre los suelos estudiados.

Sin embargo, se encuentran respuestas altamente significativas en el segundo, tercer y en la suma de los tres cortes. Esta observación se explica para la extracción continua de Ca y el aumento de la acidez

consecuente en el transcurso del crecimiento vegetal intensivo del experimento. Para la agricultura práctica este indica un problema aunque no inmediato pero a corto plazo, como resultado de una producción intensiva. Los tratamientos 3 y 4 del suelo Colorado son los más diferentes en comparaciones con los otros tratamientos, indicando ser los que mejor responden al encalado.

Si se comparan estos resultados con los encontrados sobre el efecto del encalado en la acidez del suelo, se puede concluir que la producción de materia seca y la absorción de fósforo máxima, coinciden con las dosis intermediarias de encalado, equivalente a 3,0 veces la acidez intercambiable. Este resultado coincide con la recomendación de Kamp-rath (72, 73), que el encalado en los trópicos deben ser lo suficiente para neutralizar la acidez intercambiable y que a este nivel le corresponde en la práctica tres veces el Al intercambiable.

La importancia agronómica de estos resultados es obvia. El encalado demuestra un efecto muy favorable sobre la producción en suelos ácidos. Conocer las circunstancias exactas en las cuales se produce ese aumento, es la parte más importante ya que sobrepasándose el límite óptimo del encalado se produce una disminución del rendimiento de los cultivos. Varios informes sobre encalado en los trópicos han concluido que esta práctica no es aconsejable, ya que la aplicación de altas dosis de cal, llevó a sobreencalado por falta de información adecuada.

Los resultados obtenidos más bien indican que el encalado puede tener efecto favorable y que se debe hacer estudios más detallados de las circunstancias que llevan al sobreencalamiento en diferentes condiciones. Para completar los estudios aquí presentados deben hacerse experimentos de campo que corroboren los resultados.

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente estudio, podemos indicar las siguientes conclusiones:

1. De los dos métodos tradicionales utilizados para determinar la necesidad de cal de los suelos, el método de acidez intercambiable fue el más eficiente. La dosis de cal recomendable para dichos suelos sería la equivalente a 3,0 veces la acidez intercambiable;
2. Los cambios en el punto de carga cero (ZPC) o punto isoeléctrico provocados por el encalado, fueron de 3,6 a 4,1 en suelo Colorado, de 4,0 a 4,4 en suelo Instituto y de 3,6 a 4,1 en suelo Paraíso. Este hecho implica un incremento de cargas negativas en el suelo.
3. El encalado provocó cambios en magnitud y signo de las cargas del complejo de cambio del suelo, los cuales cambiaron de positivas a negativas. Este hecho implica un aumento en la adsorción de cationes por el complejo de cambio y una disminución de la lixiviación de bases del suelo.
4. El encalado provocó cambios altamente significativos en el pH de los suelos, de 4,8 a 5,6 en suelo Colorado, de 4,9 a 5,7 en suelo Instituto y de 4,7 a 5,4 en suelo Paraíso. A pesar de que la última dosis de cal estaba calculada para elevar el pH del suelo a 6,5, no se alcanzó el valor estimado ya que parte de la cal añadida se utilizó en el desarrollo de cargas negativas.
5. El encalado tuvo efecto altamente significativo en la disminución de la acidez intercambiable de suelo, en aproximadamente de 100 por ciento.

6. Al finalizar el experimento se encontró una disminución del pH y un aumento de la acidez intercambiable en los suelos. Este fenómeno se puede explicar por el uso de fertilizantes de carácter ácido, consumo de bases por las plantas y/o por la capacidad de reemplazo del Al intercambiable.
7. El encalado tuvo efecto positivo en el incremento de la producción de materia seca y absorción de fósforo por las plantas de sorgo.
8. El nivel óptimo de encalado para la producción de materia seca y la absorción de fósforo en las plantas, bajo las condiciones de este experimento, se obtuvo cuando el pH fue elevado a valores correspondientes entre 5,2 y 5,4, en los tres suelos.
9. La determinación de las cargas eléctricas utilizando CaCl_2 0,1 N refleja mejor las condiciones de intercambio de los suelos en relación a los métodos tradicionales.

6. RESUMEN

Se estudió el efecto del encalado en el pH, acidez intercambiable, punto de carga cero (ZPC) o punto isoeléctrico, cargas eléctricas, producción de materia seca y absorción de nutrimentos en tres suelos de la vertiente Atlántica de Costa Rica: Colorado e Instituto (Typic Dystrupepts) y Paraíso (Typic Humitropept).

Las muestras de suelo correspondientes a la parte superficial (0 - 15 cm), se sometieron a incubación previa con cal por un período de 30 días. Se estableció un experimento de invernadero, utilizando como planta indicadora el sorgo (*Sorghum vulgare*). Se procedió a la siembra y posteriormente se efectuaron tres cortes de la parte aérea de las plantas, el primer corte a los 35 días después de la siembra, el segundo y tercer cortes espaciados 28 días respectivamente, evaluándose producción de materia seca y absorción de nutrimentos.

Se hizo una fertilización básica de N, P, K y elementos menores antes de la siembra, una nitrogenada después del primer corte y otra completa pero usando la mitad de la indicada para la primera fertilización después del segundo corte.

Para evaluar los cambios químicos ocurridos en el suelo durante el experimento se efectuaron tres muestreos, el primero antes del encalado, el segundo después del período de incubación con cal y el tercero al finalizar el experimento.

Los resultados demostraron que el uso del encalado provocó un aumento altamente significativo del pH; una disminución altamente significativa de la acidez intercambiable; un ligero aumento del ZPC; un cambio en las cargas eléctricas netas del suelo, disminuyendo las cargas

positivas y aumentando las cargas negativas; un incremento en la producción de materia seca y en la absorción de fósforo por las plantas.

La cantidad más adecuada de la cal aplicada bajo condiciones de este experimento equivale a la concentración de Al intercambiable multiplicada por tres.

El ámbito de pH que corresponde a la máxima producción y absorción de fósforo varía entre 5,2 y 5,4, lo que indica que el pH recomendable no tiene que alcanzar el valor de 6,5 comúnmente sugerido.

Para los Inceptisoles estudiados en este trabajo los valores del ZPC se encuentran en un ámbito donde su determinación no es crítica para las prácticas de encalado, la cual se puede realizar en base a las cantidades de Al intercambiable presente.

6a. SUMMARY

The effect of liming on pH, exchangeable acidity, zero point of charge (ZPC) or isoelectric point, electrical charges, production of dry matter, and absorption of nutrients were studied in three soils of the Atlantic coast of Costa Rica: Colorado and Instituto (Typic Dystropepts), and Paraiso (Typic Humitropept).

Surface soil samples from the top 15 cm layer were incubated for 30 days under lime treatments. Afterwards, a greenhouse experiment was established, using sorghum (*Sorghum vulgare*) as the indicator plant. The first cutting was made 35 days after planting, and a second and third cutting at 28 days intervals, for determinations of dry matter and nutrient uptake.

A basic fertilization of N, P, K and minor elements was made prior to planting, with only nitrogen following the first cutting and a complete fertilization following the second cutting but using half of the dosage applied for the first fertilization.

Chemical changes occurring in the soil during the experiment were measured at three different times: prior to liming; after the 30 days incubation period; and at the termination of the experiment.

According to results obtained, liming increased significantly soil pH; a highly significant decrease in exchangeable acidity; a slight increase in ZPC; change in the net electric charges of the soil, decreasing positive charges and increasing negative charges; increase in dry matter production; and an increase in the uptake of phosphorus by the plants.

The best rate of liming in this experiment was equivalent to three

times the concentration of exchangeable acidity (Al^{+++}).

Maximum production and maximum phosphorus uptake occurred at pH 5.2 - 5.4, which means that there is no need to raise pH to a value of 6.5 as it is usually recommended.

For the Inceptisol soils studied in this experiment, ZPC values were in a range where its determination is not critical for liming practices, which are better determined on the basis of the amount of exchangeable Al.

LITERATURA CITADA

1. ABRUÑA, F. R. y VICENTE-CHANDLER, J. Refinement of a quantitative method for determining the lime requirement of soils. *Journal of Agriculture of Puerto Rico* 39(1):41-45. 1955.
2. _____, VICENTE-CHANDLER, J. y PEARSON, R. W. Effects of liming on yields and composition of heavily fertilizer grasses and on soil properties under humid tropical conditions. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(5):657-661. 1964.
3. _____. y VICENTE-CHANDLER, J. Sugarcane yields as related to acidity of a Humid Tropic Ultisol. *Agronomy Journal* 59(4):330-332. 1967.
4. _____. et al. Crop to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols. I. Tobacco. *Soil Science Society of America Proceedings* 34(4): 629-635. 1970.
5. _____. PEARSON, R. W. y ESCOLAR, R. P. Respuesta del maíz y del frijol al encalamiento en Oxisoles y Ultisoles de Puerto Rico. *In* Bornemisza, E. y Alvarado, A., eds. *Manejo de suelos en la América Tropical*. Raleigh, North Carolina State University, 1975. pp. 267-286.
6. ADAMS, F. y PEARSON, R. W. Crop response to lime in the southern United States and Puerto Rico. *In* Pearson, R. W. y Adams, F., eds. *Soil acidity and liming*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1967. pp. 161-186.
7. AGUIRRE, A. V. Estudio de los suelos del área del Centro Tropical de Enseñanza e Investigación, IICA, Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 138 p.
8. ALMEIDA, D. L., PESSANHA, G. G. y PENTEADO, A. F. Efeito da calagem e da adubação fosfatada e nitrogenada na nodulação e produção do feijoeiro, (*Phaseolus vulgaris*). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Série Agronomia 8(7):127-130. 1973.
9. AMARAL, A. Z., et al. Parcelamento e intervalo da aplicação de calcário. *Bragantia* (Brasil) 24(8):83-96. 1965.
10. AMEDEE, G. y PEECH, M. The significance of KCl-extractable Al (III) as an index to lime requirement of soils of the humid tropics. *Soil Science* 121(4):227-233. 1976.
11. _____. y PEECH, M. Liming of highly weathered soils of the humid tropics. *Soil Science* 121(5):259-266. 1976.
12. AWAN, A. B. Efecto de cal en la disponibilidad de fósforo en los suelos de El Zamorano. *Ceiba* (Honduras) 10(2):62-67. 1964.

13. AWAN, A. B. Effect of lime on availability of phosphorus in Zamorano soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(5): 672-673. 1964.
14. AYRES, A. S. Calcium silicate slag as a growth stimulants for sugarcane on low-silicon soils. *Soil Science* 101(3):216-227. 1966.
15. BRADFIELD, R. The nature of the acidity of the colloidal clay of acid soils. *Journal of the American Chemical Society* 45(11): 2669-2678. 1923.
16. BARTLETT, R. J. y McINTOSH, J. L. pH-dependent bonding of potassium by a Spodosol. *Soil Science Society of America Proceedings* 33(4):535-539. 1969.
17. BAVER, L. D. y AYRES, A. S. Soil analysis as bases for fertilizer recommendations in sugarcane. *In International Congress Society Soil Science, 6th, Palmerston North, New Zealand, 1962. Transactions Wellington, New Zealand, 1963. pp. 835-841.*
18. BORNEMISZA, E. Conceptos modernos de acidez del suelo. *Turrialba* 15(1):20-24. 1965.
19. _____, LAROCHE, F. A. y FASSBENDER, H. Effects of liming on some chemical characteristics of Costa Rican latosol. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 27:219-226. 1967.
20. _____. e IGUE, K. Oxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. *Turrialba (Costa Rica)* 17(1):23-30. 1967.
21. BRAMS, E. A. Continuous cultivation of West African soils: organic matter deminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant and Soil* 35(2):401-414. 1971.
22. BRENES, E. y PEARSON, R. W. Root responses of three gramineae species to soil acidity in an oxisol and ultisol. *Soil Science* 116(4):295-302. 1973.
23. BROWN, I. C. A rapid method of determining exchangeable hydrogen and total exchangeable bases of soils. *Soil Science* 56(5): 353-357. 1943.
24. BUCKMAN, H. O. y BRADY, N. G. *The nature and properties of soils.* 6th ed., New York, MacMillan, 1960. pp. 386-408.
25. CATANI, R. A. y ALONSO, O. Extração do alumínio trocável e o pH do solo. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Brasil)* 26:21-29. 1969.
26. CATE, R. B. y SUKHAI, A. P. A study of aluminum in rice soils. *Soil Science* 98(2):85-93. 1964.

27. COLEMAN, N. T. y HARVARD, M. E. The heats of neutralization of acid clays and cation exchange resins. *Journal of the American Chemical Society* 75(3):6045-6046. 1953.
28. _____., KAMPRATH, J. E. y WEED, S. B. Tests for lime requirements and liming recommendations. *Advances in Agronomy* v. 10, pp. 514-517. 1958.
29. _____., WEED, S. B. y McCracken, R. J. Cation-exchange capacity and exchangeable cations in Piedmont soils of North Carolina. *Soil Science Society of America Proceedings* 23(2):146-149. 1959.
30. _____., RAGLAND, J. L. y CRAIG, D. An unexpected reaction between Al-clay or Al-soil and CaCl_2 . *Soil Science Society of America Proceedings* 24(5):419-420. 1960.
31. _____ y THOMAS, G. W. The basic chemistry of soil acidity and liming. *In* Pearson, R. W. y Adams, F., eds. *Soil acidity and liming*. Madison, Wisc., American Society of Agronomy, 1967. pp. 1-41. (Series Agronomy, no. 12).
32. DOBEREINER, J. Manganese toxicity effects on nodulation and nitrogen fixation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in acid soils. *Plant and Soil* 24(1):153-166. 1966.
33. DONDOLI, C. y TORRES, J. A. Estudio geo-agronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industria, 1954. 190 p.
34. DUCHAUFOR, P. Manual de edafología. Trad. del francés por T. Carballas Fernández, Barcelona, Turay-Masson, 1975. pp. 84-118.
35. DUNN, L. E. Lime requirement determination of soils by means of titulation curves. *Soil Science* 56(5):341-351. 1943.
36. EL-SWAIFY, S. A. Structural changes in tropical soil due to anions in irrigation water. *Soil Science* 115(1):64-72. 1973.
37. _____ y SAYEGH, A. H. Change characteristics of an oxisol and an inceptisol from Hawaii. *Soil Science* 120(1):49-56. 1975.
38. ESPINOZA, W., GAST, R. G. y ADAMS, R. S., Jr. Charge characteristics and nitrate retention by two andepts from south Central Chile. *Soil Science Society of America Proceedings* 39(5):842-846. 1975.
39. EVANS, C. E. y KAMPRATH, E. J. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Science Society of America Proceedings* 34(6):893-896. 1970.

40. FASSBENDER, H. W. Efecto del encalado en la mejor utilización de fertilizantes fosfatados en un andosol de Costa Rica. *Fitotecnica Latinoamericana (Venezuela)* 6(1):115-127. 1969.
41. _____ y MOLINA, R. Influencia de enmiendas calcáreas y silicatadas sobre el efecto de fertilizantes fosfatados en suelos derivados de cenizas volcánicas de Costa Rica. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina, Turrialba, Costa Rica, 1969.* pp. c.2.1-c.2.12.
42. _____. *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina.* Turrialba, Costa Rica, IICA, 1975. pp. 168-208.
43. FISKEEL, J. G. A., et al. Aluminum studies on some North and Central Florida soils. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 18:166-178. 1958.
44. FOY, C. D. y BROWN, J. C. Toxic factor in acid soils: I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. *Soil Science Society of America Proceedings* 27(4):403-407. 1963.
45. _____, FLEMING, A. L. y SCHWARTZ, J. W. Opposite aluminum and manganese tolerances of two wheat varieties. *Agronomy Journal* 65(1):123-126. 1973.
46. FOX, R. L., DEDATTA, S. K. y WANG, J. M. Phosphorus and aluminum uptake by plants from Latosols in relation to liming. In *International Congress of Soil Science, 8th, Bucharest, 1964.* Transactions Bucharest, Academy of the Socialist Republic of Romania, 1964. v.4, pp. 595-603.
47. _____. y PLUCKNETT, D. L. Overliming Hawaiian soils creates problems. *Hawaii Farm Science* 13(3):9-10. 1964.
48. FRANCA, A. A. y DOBEREINER, J. Toxidez de manganés de um solo ácido na simbiose soja-Rhizobium. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia* 6:57-66. 1971.
49. FREITAS, L. M. M. y PRATT, P. F. Response of three legumes to lime in various acid soils in Sao Paulo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia* 4:89-95. 1969.
50. _____, LOBATO, E. y SOARES, W. V. Experimentos de calagem e adubação em solos sob vegetação de Cerrado de Distrito Federal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia* 6:81-89. 1971.
51. _____. y VAN RAIJ, B. Efectos residuales del encalado de un Latosol en São Paulo, Brasil. In *Bornemisza, E. y Alvarado, A., eds. Manejo de suelos en la América Tropical.* Raleigh, North Carolina State University, 1975. pp. 304-311.

52. FUENTES, R. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en algunos suelos ácidos de origen volcánica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 112 p.
53. GHANI, M. O., HASAN, K. A. y KHAN, M. F. A. Effect of liming on aggregation, noncapillary pore space, and permeability of a lateritic soil. *Soil Science* 80(6):469-478. 1955.
54. GOEDERT, W. J., COREY, R. B. y SYERS, J. K. Lime effects on potassium equilibrio in soils of Rio Grande do Sul, Brasil. *Soil Science* 120(2):107-111. 1975.
55. GOEPFERT, C. F. y JARDIM FREIRE, J. R. Influência da aeração do solo e da calagem sobre o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) em três solos ácidos do Rio Grande do Sul. *Agronomia Sulriograndense (Brasil)* 9(2):143-149. 1973.
56. GRAHAM, P. H. y HUBBEL, D. Interacción suelo-Rhizobium en la agricultura tropical. In Bornemisza, E. y Alvarado, A., eds. *Manejo de suelos en la América Tropical*. Raleigh, North Carolina State University, 1975. pp. 217-233.
57. GUAZZELLI, R. J., et al. Efeitos agrônômicos e econômicos do calcário. Nitrogenio, fósforo, potássio, enxofre e micronutrientes nos rendimentos de soja feijão em Uberaba, Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira, Série Agronomia* 8(6):29-37. 1973.
58. GUPTA, V. C., CALDER, F. W. y MACLED, I. B. Influence of added limestone and fertilizers upon the micro-nutrient content of forage tissue and soil. *Plant and Soil* 35(2):248-256. 1971.
59. HARDY, F. Soils of the IAIAS areas. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 76 p. (mimeografiado).
60. HARRIS, R. F., CHESTERS, G. y ALLEN, O. N. Dynamics of soil aggregation. *Advances in Agronomy* 18:107-169. 1966.
61. HEMWALL, J. B. The fixation of phosphorus by soils. *Advances in Agronomy* 9:95-111. 1957.
62. HERNANDEZ-MEDINA, E., VELZ-SANTIAGO, J. y LUGO-LOPEZ, M. A. Root development of Acerola trees as affected by liming. *Journal of Agriculture of University of Puerto Rico* 54(1):57-61. 1970.
63. HORTENSTINE, C. C. The effect of lime and phosphorus fertilization on oats and soils phosphorus in Lakeland fine sand in small lysimeters. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 24:35-42. 1965.

64. HORTENSTINE, C. C. y BLUE, W. G. Growth responses in three plant species to lime and phosphorus applied to Puletan loamy fine sand. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings 28:23-28. 1968.
65. HSU, P. H. Fixation of phosphate by aluminum and iron in acid soils. Soil Science 99(6):398-402. 1965.
66. HUNTER, A. H. Métodos propuestos para analizar azufre y boro en los suelos. Raleigh, N. C., Proyecto Internacional de Evaluación y Mejoramiento de la Fertilidad del Suelo, 1975. 2 p. (mimeo).
67. IGUE, K. y GARGANTINI, H. Efeito da calagem e da adubação fosfatada em solo ácido e de baixa fertilidade, na cultura de trigo. Bragantia (Brasil) 29(5):60-66. 1970.
68. JACKSON, M. L. Aluminum bonding in soils: a unifying principle in soil science. Soil Science Society of America Proceedings 27(1):1-10. 1963.
69. _____. Análisis química de suelos, una importante contribución al estudio de la química de suelo. Traducido por José Beltrán Martínez. Barcelona, Omega, 1964. 662 p.
70. JENNY, H. Reflections on the soil acidity merry-go-round. Soil Science Society of America Proceedings 25(6):428-432. 1961.
71. JONES, R. y UEHARA, G. Amorphous coatings on mineral surfaces. Soil Science Society of America Proceedings 37(5):782-798. 1973.
72. KAMPRATH, E. J. Acidez del suelo y su respuesta al encalado. Raleigh, N. C., Estación Experimental Agrícola, Proyecto Internacional de Análisis de Suelo. Boletín, no. 4. 1967. 22 p.
73. _____. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached numeral soils. Soil Science Society of America Proceedings 34(2):252-254. 1970.
74. _____. Potential detrimental effects from liming highly weathered soils to neutrality. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings 31:200-203. 1971.
75. KEENEY, O. R. y COREY, R. B. Factors affecting the lime requirement of Wisconsin soils. Soil Science Society of America Proceedings 27(3):277-280. 1963.
76. KENG, J. G. W. y UEHARA, G. Chemistry, mineralogy, and taxonomy of oxisols and ultisols. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings 33:119-126. 1974.

77. LAROCHE, F. A. A calagem em solos tropicais de clima úmido. *Fitotecnica Latinoamericana (Venezuela)* 3(1,2):83-97. 1966.
78. _____. Efeitos da calagem sobre o complexo de troca de um Latosolo tropical e os teores de cátions absorvidos pelo tomate. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1966. 76 p.
79. LOPEZ, M. Respuesta al encalado en un suelo derivado de cenizas volcánicas. Cambios en el pH y la nitrificación. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* 3(1):156-169. 1971.
80. LOTERO, J. et al. Respuesta de gramíneas y leguminosas forrajeras al encalado. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* 3(1):210-239. 1970.
81. LOW, P. F. The role of aluminum in the titration of bentonite. *Soil Science Society of America Proceedings* 19(2):135-139. 1955.
82. LUND, Z. F. The effect of calcium and its relation to several cations in soya bean root growth. *Soil Science Society of America Proceedings* 34(3):456-459. 1970.
83. MACIAS, M. V. Propiedades morfológicas, físicas, químicas y clasificación de ocho "Latosoles" de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. 193 p.
84. MAHILUM, B. C., FOX, R. L. y SILVA, J. A. Residual effects of liming volcanic ash soils in the humid tropics. *Soil Science* 109(2):102-109. 1970.
85. MARE, P. H. L. Experiment on the effect of phosphate applied to a Bugand Soil. 1. Pot experiment on the response curve. *Journal of Agriculture Science* 70(3):265-270. 1968.
86. MARIN, M. G. Recomendaciones tentativas para la fertilización y encalado de varios cultivos de acuerdo con análisis de suelo. Primera aproximación. *Revista ICA (Colombia)* 3:91-102. 1968.
87. MARSHALL, C. E. *The colloid chemistry on the silicate minerals.* New York, Academic Press, 1949. 195 p.
88. MARTINI, J. A. Algunas notas sobre el problema del encalado en los suelos del trópico. Turrialba (Costa Rica) 18(3):249-256. 1968.
89. _____. et al. Response of soybeans to liming and related to soil acidity, Al and Mn toxicities and P in some oxisols of Brasil. *Soil Science Society of America Proceedings* 38(4):616-620. 1974.
90. MASCARENHAS, H. A. A. et al. Adubação mineral de feijoeiro. XII. Efeitos da calagem, do nitrogenio e do fósforo em solo Latosol vermelho amarelo de vale do Ribeira. *Bragantia (Brasil)* 28:71-83. 1969.

91. MATSUSAKA, Y. y SHERMAN, G. D. Lime requirements of Hawaiian soils. Hawaii Farm Science 13(3):5-7. 1964.
92. McCART, G. D. y KAMPRATH, E. J. Supplying calcium and magnesium for cotton on sandy, low cation exchange capacity soils. Agronomy Journal 57(4):404-407. 1965.
93. McCLUNG, A. C., et al. Preliminary fertility studies on Campo Cerrado soils in Brazil. IBEC Research Institute. Bulletin no. 13. 1957. 26 p.
94. _____., et al. Cotton fertilization on Campo Cerrado soils of Sao Paulo, Brazil. IBEC Research Institute. Bulletin, no. 27. 1961. 35 p.
95. McLEAN, E. O., et al. Aluminum in soils. V. Form of aluminum as a cause of soil acidity and a complication in its measurement. Soil Science 97(2):119-125. 1964.
96. _____., DUMFORD, S. W. y CORONEL, E. A comparison of several methods of determining lime requirement of soils. Soil Science Society of America Proceedings 30(1):26-30. 1966.
97. MEKARI, T. y UEHARA, G. Anion adsorption in feruginous tropical soils. Soil Science Society of America Proceedings 36(2): 296-300. 1972.
98. MEHLICH, A. y COLEMAN, N. T. Type of soil colloid and the mineral nutrition of plants. Advances in Agronomy 4:67-99. 1952.
99. MIKKELEN, D. S., FREITAS, L. M. M. y McLUNG, A. C. Effects of liming and fertilizing on cotton, corn and soybeans on Campo Cerrado soil, State of São Paulo, Brazil. IRI Research Institute Incorporation. Bulletin, no. 23. 1963. 34 p.
100. MIYASAKA, S., FREIRE, E. S. y ABRAMIDES, A. Adubação de soja. 4. Estudo preliminar sobre maneiras de efetuar a calagem com calcário dolomítico e cal extinta. Bragantia (Brasil) 25:223-231. 1966.
101. MONTEITH, N. H. y SHERMAN, G. D. The comparative effects of calcium and calcium silicate on yield of sudangrass grown in a ferruginous latosol and a hydrol humic latosol. Hawaii Agricultural Experiment Station. Technical Bulletin no. 53. 1963. 40 p.
102. MORELLI, M. Influencia da calagem no complexo de troca e movimento do cálcio e magnésio em um Andosol de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 56 p.
103. MUKHERJEE, J. N., et al. On the nature of reactions responsible for soil acidity. VII. Indian Journal Agricultural Science 12(1): 86-104. 1942.

104. MURRMANN, R. P. y PEECH, M. Reaction products of applied phosphate in limed soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 32(4):493-496. 1968.
105. PARRA, J. H. El encalamiento de cinco cultivos en suelos de cenizas volcánicas, experimentación en zona cafetera. *Cenicafé* (Colombia) 20(3):91-109. 1969.
106. PARKS, G. A. The isoelectric points of solid oxides, solid hidroxides, and aqueous hidroxocomplex systems. *Chemical Review* 65:177-198. 1965.
107. PAVER, H. y MARSHALL, C. E. The role of aluminum in the reactions of the clays. *Journal Society Chemistry and Industry* 53:750-760. 1934.
108. PEARSON, R. W., ABRUÑA, R. y VICENTE-CHANDLER, J. V. Effect of lime nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium two humid tropical spils of Puerto Rico. *Soil Science* 93(2):77-82. 1962.
109. _____. Problemas de acidez en el sub-suelo. *Suelos Ecuatoriales* (Colombia) 3(1):294-309. 1971.
110. PEECH, M. Exchange acidity. In Black, C. A., ed. *Method of soil analysis*. Madison, Wisc., America Society of Agronomy, 1965. v.2, pp. 105-113.
111. POPENOE, H. Some soil cation relationships in an area of shifting cultivation in the humid tropics. In *International Congress Soil Science, 7th, Madison, Wisconsin, 1960. Transactions Amsterdam, Elsevier, 1961. v.2, pp. 303-311.*
112. PRATT, P. F. Effect of pH on cation-exchange capacity of surface soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 25(2):96-98. 1961.
113. REEVE, N. G. y SUMNER, M. E. Effects of aluminum toxicity and phosphorus fixation on crop growth on oxisols in Natal. *Soil Science Society of America Proceedings* 34(2):263-267.
114. RICH, C. I. Removal of excess salt in cation-exchange-capacity determinations. *Soil Science* 93(1):87-93. 1962.
115. RIOS, V. y MARTINI, J. A. Efecto del encalado sobre la acidez y el contenido de aluminio y hierro extraíble en nueve suelos de Panamá. *Turrialba* (Costa Rica) 18(2):139-146. 1968.
116. RIOS, M. A. y PEARSON, R. W. The effect of some chemical environmental factors on cotton root behavior. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(2):232-235. 1964.

117. RIXON, A. J. y SHERMAN, G. D. Effects of heavy lime applications to volcanic-ash soils in the humid tropics. *Soil Science* 94(1):19-27. 1962.
118. ROSS, G. J., LAWTON, K. y ELLIS, B. C. Lime requirement related to physical and chemical properties of nine Michigan soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(2):209-212. 1964.
119. SAIZ DEL RIO, J. F. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos, métodos de laboratorio para diagnosis de fertilidad. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 107 p.
120. SAWHNEY, B. L., FRINK, C. R. y HILL, D. E. Components of pH dependent cation exchange capacity. *Soil Science* 109(5):272-278. 1970.
121. _____. y NORRISH, K. pH dependent cation exchange capacity; minerals and soil of tropical regions. *Soil Science* 112(3): 213-215. 1971.
122. SCHOFIELD, R. K. Effect of pH on electric charges carried by clay particles. *Journal of Soil Science* 1(1):1-18. 1949.
123. _____. y TAYLOR, A. W. The hydrolysis of Al salt solution. *Journal Chemical Society* 18:4445-4448. 1954.
124. SCUFFELEN, A. C. y MIDDELBURG, H. A. Structural deterioration of lateritic soils through liming. In *International Congress of Soil Science, 5th, Leopoldville, 1954*. Transactions, Bruxelles, General Secretary's Office, 1954. v.2, pp. 158-165.
125. SEATZ, L. F. y PETERSON, H. D. Acid alkaline, saline and sodic soils. In Bear, E. F., ed. *Chemistry of the soil*. 2nd edition. New York, Reinhold, 1964. pp. 292-319.
126. SHOEMAKER, H. E., McLEAN, E. O. y PRATT, P. F. Buffer methods for determining lime requirement on soils with appreciable amounts of extractable aluminum. *Soil Science Society Proceedings* 25(4):274-277. 1961.
127. SHUKLA, S. S. et al. Sorption of inorganic phosphate by lake sediments. *Soil Science Society of America Proceedings* 35(2): 244-249. 1971.
128. SOARES, W. B. et al. Encalado de los suelos del Cerrado Brasileño. In Bornemisza, E. y Alvarado, A., eds. *Manejo de suelos en la América Latina Tropical*. Raleigh, North Carolina State University, 1975. pp. 287-302.
129. SOUTO, S. M. y DOBEREINER, J. Toxidez de manganes em leguminosas forrageiras tropicais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, série Agronomia* 4:129-138. 1969.

130. SPAIN, J. M. et al. Diferencias entre especies y variedades de cultivos y pastos tropicales en su tolerancia a la acidez del suelo. In Bornemisza, E. y Alvarado, A., eds. Manejo de suelos en la América Tropical. Raleigh, North Carolina State University, 1975. pp. 313-335.
131. SUMNER, M. E. Effect of alcohol washing and pH value of leaching solution on positive and negative charges in ferruginous soils. *Nature* 198(8):1018-1019. 1963.
132. _____ y DAVIDTZ, J. C. Positive and negative charges in some Natal soils. *South African Journal of Agriculture Science* 8: 1045-1050. 1965.
133. TISDALE, L. S. y NELSON, W. L. Soil fertility and fertilizers. 2nd edition. New York, McMillan, 1967. 694 p.
134. TOBON, J. H. C. y LEON, L. A. S. Comparación de varios métodos para determinar requerimiento de cal en algunos suelos Colombianos. *Suelo Ecuatoriales (Colombia)* 3(1):66-87. 1971.
135. TRIGOSO, H. R. Algunos factores que afectan la fijación simbiótica del nitrógeno. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1970. 143 p.
136. UEHARA, G. y KENG, J. Relaciones entre la mineralogía y el manejo de suelos en la América Latina. In Bornemisza, E. y Alvarado, A., eds. Manejo de suelos en la América Tropical. Raleigh, North Carolina State University, 1975. pp. 357-369.
137. VAN RAIJ, B. y PEECH, M. Electrochemical properties of some Oxisols and Ultisols of the tropics. *Soil Science Society of America Proceedings* 36(4):587-593. 1972.
138. VELASCO DE PEDRO, F. V. y MARTINEZ, P. M. Cargas permanentes y variables en el complejo de cambio de una catena de suelos de la sierra de Guadarrama. *Anales de Edafología y Agrobiología (España)* 30(11-12):1065-1075. 1973.
139. VELEZ, J. y BLUE, W. G. Effect of lime on extractable iron and aluminum, and phosphorus sorption in a tropical and a temperate soil. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings* 31:169-173. 1971.
140. VELLY, J. Observations on the acidification of some soils in Madagascar. *Agronomie Tropicale* 29(12):1249-1262. 1974.
141. VENEMA, K. C. W. Some notes regarding mobile aluminum and iron in acid tropical soils. II. Potash and Tropical Agriculture 6(4): 67-85. 1963.

142. VICENTE-CHANDLER, J. et al. The intensive management of tropical forages in Puerto Rico. Puerto Rico, Agricultural Experiment Station. Bulletin no. 187. 1964. 152 p.
143. VILLACHICA, H. L. y QUEVEDO, F. Efecto del encalado en el rendimiento y la concentración de nutrimentos en el sorgo. Turrialba (Costa Rica) 22(1):11-18. 1972.
144. _____. Respuesta del sorgo al encalado y fertilización. II. Concentración de Ca, Mg, microelementos. Fitotecnia Latinoamericana (Venezuela) 9(1):74-81. 1973.
145. WALKLEY, A. y BLACK, I. A. An examination of degtjareff method for determining soil organic and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1):29-38. 1934.
146. WOODRUFF, C. M. Testing soils for lime requirements by means of a buffered solution and the glass electrode. Soil Science 66(1):53-63. 1948.
147. WOODRUFF, J. R. y KAMPBATH, E. J. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Science Society of America Proceedings 29(2):148-150. 1965.
148. WEAR, J. I. y PATTERSON, R. M. Effect of pH and texture on the availability of water soluble boron in the soil. Soil Science Society of America Proceedings 26(3):344-346. 1962.
149. WEEKS, M. E. y LATHWELL, D. L. Crop response to lime in the north-eastern United States. In Pearson, R. W. y Adams, F., eds. Soil acidity and liming. Madison, Wis., America Society of Agronomy, 1967. pp. 233-259. (Series Agronomy 12).
150. WHITE, R. P. Effects of lime upon soil and plant manganese levels in an acid soil. Soil Science Society of America Proceedings 34(4):625-629. 1970.
151. YUAN, T. L. Determination of exchangeable hydrogen in soils by a titration method. Soil Science 88(2):164-167. 1958.

8. A P E N D I C E

Cuadro I Registro de los valores de pH obtenido por la curva de titulación según método de Abruña y Chandler

Niveles de Ca (OH) ₂	Colorado pH	Instituto pH	Paraíso pH
0	4,8	5,2	5,0
5	5,0	5,4	5,2
15	5,8	6,1	5,8
20	6,1	6,5	6,0
30	6,7	6,9	6,4
40	7,3	7,3	6,9
50	7,8	7,7	7,3

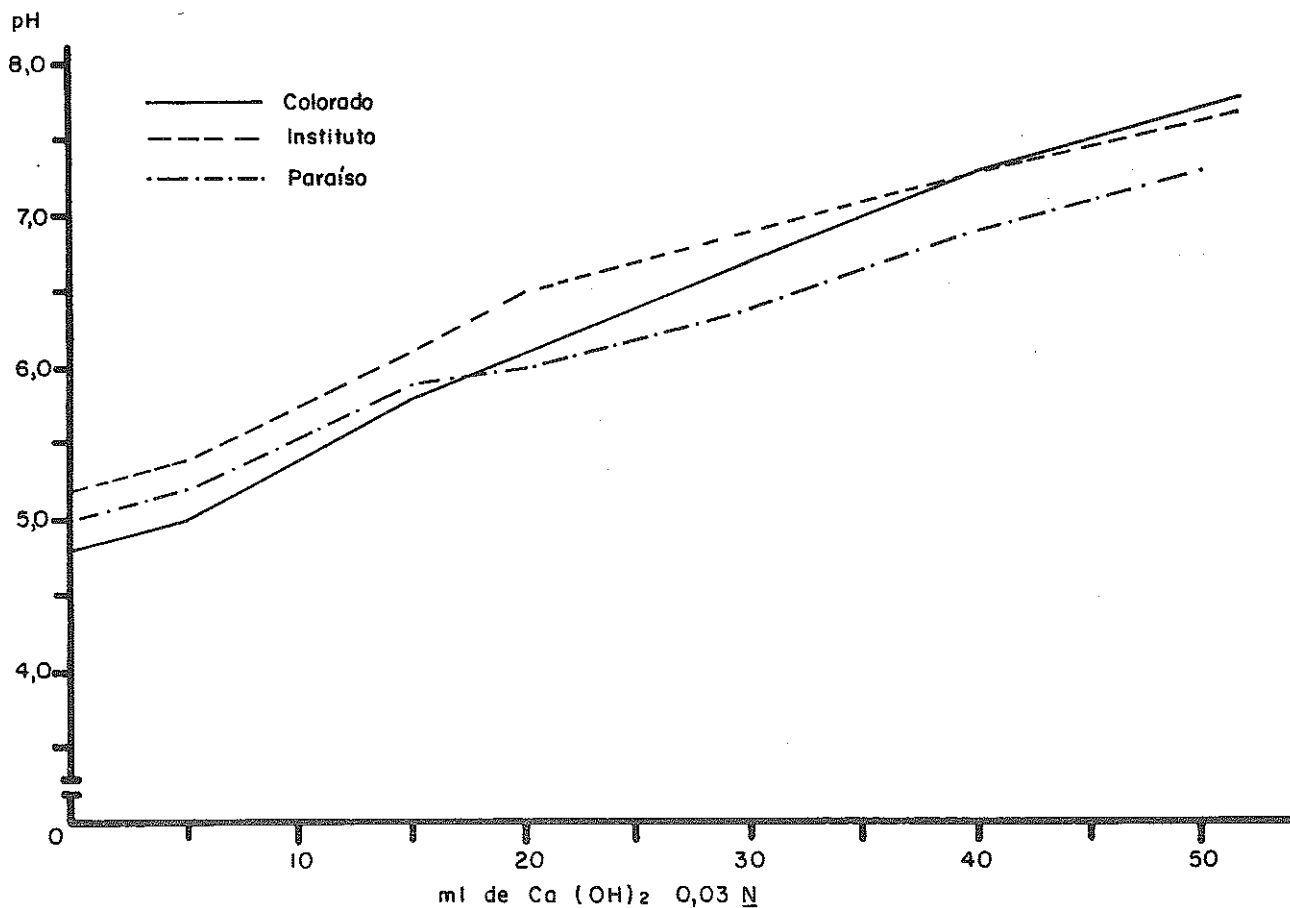


Fig.1 Curva de requerimiento de cal, método de Abruña y Vicente - Chandler

Cuadro 2. Valores del pH de los suelos en las dos épocas de muestreo.

Suelo	Trat.	Después de incubación		Después del último corte	
		pH H ₂ O	pH KCl	pH H ₂ O	pH KCl
Colorado	0	4,8	4,1	4,5	3,6
	1	5,0	4,3	4,8	3,8
	2	5,2	4,5	4,9	3,8
	3	5,4	4,6	5,1	4,0
	4	5,6	4,8	5,3	4,2
Instituto	0	4,9	4,1	4,1	3,7
	1	5,1	4,3	4,2	3,8
	2	5,3	4,4	4,4	3,9
	3	5,5	4,8	4,8	4,1
	4	5,7	5,0	4,9	4,2
Paraiso	0	4,7	3,8	4,5	3,7
	1	4,9	4,0	4,7	3,8
	2	5,0	4,2	4,8	3,9
	3	5,3	4,3	5,1	4,0
	4	5,4	4,6	5,3	4,2

Cuadro 3. Valores de acidez intercambiable de los suelos en las dos épocas de muestreo.

Suelo	Trat.	Después de incubación			Después del último corte		
		Al	H	H + Al	Al	H	H + Al
Colorado	0	0,65	0,92	1,57	1,35	1,35	2,70
	1	0,31	0,43	0,74	0,92	1,08	2,00
	2	0,15	0,21	0,36	0,56	0,66	1,12
	3	0,11	0,11	0,22	0,25	0,45	0,70
	4	0,11	0,08	0,19	0,18	0,26	0,44
Instituto	0	0,35	0,48	0,83	0,82	1,49	2,25
	1	0,24	0,28	0,52	0,76	1,37	2,13
	2	0,18	0,24	0,42	0,63	1,10	1,73
	3	0,10	0,14	0,24	0,44	0,54	0,98
	4	0,09	0,04	0,13	0,27	0,46	0,73
Paraiso	0	0,62	0,69	1,31	0,79	1,09	1,88
	1	0,28	0,50	0,78	0,55	0,79	1,32
	2	0,15	0,24	0,39	0,24	0,56	0,80
	3	0,12	0,14	0,26	0,16	0,37	0,50
	4	0,09	0,11	0,20	0,11	0,31	0,42

Cuadro 4. Ecuaciones de regresión y valores de "R" entre el enca-
lado con el pH y acidez intercambiable del suelo.

Suelo	X	Y	Ecuación de regresión	R ²
Colorado	Encalado	pH*	$4,751 + 0,097x$	99,35
"	"	pH**	$4,519 + 0,092x$	96,44
"	"	acidez*	$1,559 - 0,377x + 0,026x^2$	99,78
"	"	acidez**	$2,739 - 0,349x + 0,007x^2$	99,48
Instituto	"	pH*	$4,895 + 0,138x$	99,02
"	"	pH**	$4,114 + 0,146x$	94,75
"	"	acidez*	$0,780 - 0,223x + 0,019x^2$	97,13
"	"	acidez**	$2,354 - 0,370x + 0,015x^2$	97,22
Paraiso	"	pH*	$4,677 + 0,084x$	99,45
"	"	pH**	$4,493 + 0,081x$	97,85
"	"	acidez*	$1,302 - 0,300x + 0,020x^2$	99,20
"	"	acidez**	$1,884 - 0,339x + 0,019x^2$	99,76

* después del período de incubación con cal

** después del último corte del cultivo (muestreo final)

Cuadro 5. Resultado de los contrastes realizados para observar la influencia del encalado en el pH del suelo.

Contraste	Epoca del muestreo (valor de F)	
	Suelo incubado	Final del experimento
Colorado T vs resto	52,52 **	343,75 **
Colorado 2 + 4 vs 3	0,01 ns	0,00 ns
Colorado 2 vs 4	22,22 **	87,50 **
Colorado 1 vs 2 + 3 + 4	17,76 **	165,62 **
Instituto T vs resto	39,90 **	246,87 **
Instituto 2 + 4 vs 3	6,06 *	3,75 ns
Instituto 2 vs 4	36,36 **	281,25 **
Instituto 1 vs 2 + 3 + 4	49,49 **	168,75 **
Paraiso T vs resto	42,42 **	268,75 **
Paraiso 2 + 4 vs 3	0,15 ns	6,66 *
Paraiso 2 vs 4	26,26 **	125,00 **
Paraiso 1 vs 2 + 3 + 4	129,29 **	100,00 **

** significativo al 1%

* significativo al 5%

T - testigo

Cuadro 6. Cuadrados medios de los análisis de varianza del pH y de la acidez intercambiable del suelo.

F.V.	G.L.	Cuadrados medios			
		Epoca 1		Epoca 2	
		pH	acidez	pH	acidez
Tratamiento	14	0,473**	0,926**	0,634**	2,791**
Error	60	0,003	0,001	0,020	0,012
Total	74	---	---	---	---

Epoca 1 Después del período de incubación con cal

Epoca 2 Después del último corte del cultivo

** Significante al 1%

Cuadro 7. Resultado de los contrastes realizados para observar la influencia del encalado en la acidez intercambiable.

Contraste	Epoca del muestreo (valor de F)	
	Suelo incubado	Final del experimento
Colorado T vs resto	4115,10 **	829,20 **
Colorado 2 + 4 vs 3	6,73 *	1,62 ns
Colorado 2 vs 4	43, 16 **	92,80 **
Colorado 1 vs 2 + 3 + 4	625,90 **	469,60 **
Instituto T vs resto	719,42 **	236,00 **
Instituto 2 + 4 vs 3	2,30 ns	16,80 **
Instituto 2 vs 4	172,66 **	200,00 **
Instituto 1 vs 2 + 3 + 4	669,06 **	290,40 **
Paraiso T vs resto	2366,90 **	396,80 **
Paraiso 2 + 4 vs 3	3,11 ns	3,46 ns
Paraiso 2 vs 4	57,55 **	29,60 **
Paraiso 1 vs 2 + 3 + 4	374,11 **	168,00 **

** Significante al 1%

* Significante al 5%

T - Testigo

Cuadro 8. pH del suelo en diferentes concentraciones de NaCl y con diferentes adiciones de HCl o NaOH, Suelo Colorado.

Acido o base adicionados meq/100g	Lectura del potenciómetro (pH)			
	NaCl 1N	NaCl 0,1N	NaCl 0,01N	NaCl 0,001N
<u>Testigo</u>				
10,0	3,3	3,2	2,9	2,7
5,0	3,5	3,4	3,3	3,2
2,5	3,7	3,9	4,1	4,3
0	3,9	4,2	4,4	4,6
2,5	4,3	4,8	5,2	5,6
5,0	4,8	5,4	5,9	6,4
10,0	5,2	5,8	6,5	7,0
<u>Tratamiento 2</u>				
10,0	3,4	3,3	3,3	3,0
5,0	3,6	3,5	3,4	3,4
2,5	3,8	4,2	4,6	4,7
0	4,3	4,7	5,0	5,2
2,5	4,8	5,2	5,6	6,0
5,0	5,2	5,7	6,2	6,6
10,0	5,8	6,5	6,9	7,4
<u>Tratamiento 4</u>				
10,0	3,6	3,5	3,4	3,3
5,0	4,0	3,9	3,8	3,7
2,5	4,3	4,5	4,7	4,9
0	4,7	5,0	5,2	5,4
2,5	5,0	5,5	5,9	6,1
5,0	5,5	5,9	6,5	6,8
10,0	6,0	6,7	7,1	7,5

Cuadro 9. pH del suelo en diferentes concentraciones de NaCl y con diferentes adiciones de HCl o NaOH, Suelo Instituto.

<u>Testigo</u>				
10,0	3,4	3,2	3,1	3,0
5,0	3,7	3,5	3,4	3,3
2,5	3,9	3,8	3,7	3,7
0	4,3	4,5	4,8	5,0
2,5	4,8	4,9	5,2	5,4
5,0	5,2	5,3	5,6	5,8
10,0	5,5	5,7	6,5	6,7
<u>Tratamiento 2</u>				
10,0	3,7	3,5	3,3	3,1
5,0	3,9	3,7	3,6	3,5
2,5	4,2	4,3	4,6	4,7
0	4,6	4,9	5,3	5,4
2,5	5,0	5,5	6,0	6,3
5,0	5,4	6,1	6,6	6,9
10,0	6,0	6,8	7,3	7,4
<u>Tratamiento 4</u>				
10,0	4,1	3,8	3,7	3,5
5,0	4,3	4,0	3,9	3,7
2,5	4,6	4,7	4,8	4,9
0	5,0	5,2	5,4	5,5
2,5	5,4	5,8	6,2	6,4
5,0	5,8	6,2	6,8	7,1
10,0	6,5	6,9	7,4	7,6

Cuadro 10. pH del suelo en diferentes concentraciones de NaCl y con diferentes adiciones de HCl o NaOH, Suelo Paraiso.

<u>Testigo</u>				
10,0	3,3	3,2	3,0	2,8
5,0	3,4	3,4	3,3	3,2
2,5	3,7	3,8	4,0	4,0
0	4,0	4,1	4,6	4,7
2,5	4,3	4,5	5,4	5,7
5,0	4,8	4,9	6,0	6,3
10,0	5,4	5,7	6,7	6,9
<u>Tratamiento 2</u>				
10,0	3,5	3,4	3,4	3,2
5,0	3,7	3,6	3,5	3,5
2,5	3,9	4,0	4,4	4,5
0	4,4	4,5	4,9	5,0
2,5	4,8	4,9	5,6	6,0
5,0	5,1	5,3	6,2	6,7
10,0	5,8	6,2	6,8	7,2
<u>Tratamiento 4</u>				
10,0	3,7	3,6	3,5	3,3
5,0	3,9	3,8	3,7	3,7
2,5	4,3	4,3	4,6	4,7
0	4,6	4,8	5,1	5,2
2,5	5,0	5,1	5,8	6,1
5,0	5,3	5,6	6,4	6,7
10,0	5,9	6,2	7,0	7,5

Cuadro 11. Adsorción de Na^+ y de Cl^- , y carga neta de los suelos.

Suelo	Trat.	pH*	Cargas, meq/100g de suelo					
			+			-		
			$(\text{Cl}^- \text{ adsorbido})$	$(\text{Na}^+ \text{ adsorbido})$	(cargas netas)	$(\text{Cl}^- \text{ adsorbido})$	$(\text{Na}^+ \text{ adsorbido})$	(cargas netas)
			0,1N	0,2N	0,1N	0,2N	0,1N	0,2N
Colorado	0	4,8	15,4	23,1	13,9	21,1	+1,5	+2,0
	2	5,2	14,5	20,1	15,0	23,5	-0,5	-3,4
	4	5,6	13,2	18,8	17,4	24,3	-4,2	-5,5
Instituto	0	4,9	15,0	22,8	13,2	20,4	+1,8	+2,4
	2	5,1	14,1	20,6	13,7	21,1	+0,4	-0,5
	4	5,7	12,6	19,5	16,5	24,3	-3,9	-4,8
Paraiso	0	4,7	17,2	24,4	15,3	22,3	+1,9	+2,1
	2	5,0	15,6	23,8	17,6	26,3	-2,0	-2,5
	4	5,4	15,1	21,8	19,9	28,0	-4,8	-6,2

* pH de equilibrio

Cuadro 12. Adsorción de Ca^{+2} y Cl^{-} , y carga neta de los suelos.

Suelo	Trat.	pH*	Cargas, meq/100g de suelo					
			+			-		
			(Cl^{-} adsorbido) 0,01N	(Ca^{++} adsorbido) 0,01N	(cargas netas) 0,01N	(Cl^{-} adsorbido) 0,1N	(Ca^{++} adsorbido) 0,1N	(cargas netas) 0,1N
Colorado	0	4,8	6,4	15,8	6,0	12,4	+0,4	+3,4
	2	5,2	5,9	13,1	7,6	15,6	-1,7	-2,5
	4	5,6	5,7	11,4	8,6	16,0	-3,9	-4,6
Instituto	0	4,9	6,9	15,2	5,8	12,1	+1,1	+3,1
	2	5,1	6,2	14,3	7,8	16,2	-1,6	-1,9
	4	5,7	5,0	12,8	9,2	18,2	-4,2	-5,4
Paraiso	0	4,7	6,3	15,8	5,6	14,2	+1,6	+3,2
	2	5,0	5,7	15,2	8,9	20,0	-3,2	-4,8
	4	5,4	5,4	14,7	10,7	21,3	-5,3	-6,8

* pH de equilibrio

Cuadro 13. Adsorción de Mg^{+2} y de $SO_4^{=}$ y carga neta de los suelos.

Suelo	Trat.	pH*	Cargas, meq/100 de suelo					
			+			-		
			$(SO_4^{=}$ adsorbido)	$(Mg^{+2}$ adsorbido)	(cargas netas)	$(SO_4^{=}$ adsorbido)	$(Mg^{+2}$ adsorbido)	(cargas netas)
0.001N	0.01N	0.001N	0.001N	0.01N	0.001N	0.01N		
Colorado	0	4,8	4,7	11,3	7,7	8,3	+3,0	+3,0
	2	5,2	3,9	8,1	9,2	14,7	-5,3	-6,6
	4	5,6	3,0	7,8	10,2	15,6	-7,2	-7,8
Instituto	0	4,9	4,4	10,3	5,9	8,4	+1,5	+1,9
	2	5,1	3,9	9,7	8,3	14,8	-4,4	-5,1
	4	5,7	3,1	8,8	9,8	16,0	-6,6	-7,2
Paraiso	0	4,7	4,7	12,9	10,0	8,7	+1,9	+4,2
	2	5,0	3,9	11,4	12,0	17,7	-5,1	-6,3
	4	5,4	2,5	11,0	15,5	19,0	-7,8	-8,0

* pH de equilibrio

Cuadro 14. Cantidad de biomasa expresado en materia seca (g/mace-
ta) de sorgo correspondientes a los tres cortes y el
total.

Suelo	Tratamiento	1º corte	2º corte	3º corte	Total
Colorado	0	21,78	17,39	16,12	55,30
	1	25,98	23,80	20,42	70,20
	2	24,10	24,10	19,20	67,50
	3	22,98	27,40	22,74	73,12
	4	26,18	28,80	21,66	76,64
Instituto	0	22,80	15,60	13,06	51,47
	1	21,46	15,39	12,08	48,94
	2	23,64	16,60	13,18	53,42
	3	23,62	19,40	15,38	58,40
	4	23,04	18,80	18,12	59,96
Paraiso	0	24,78	14,62	13,92	53,30
	1	25,34	18,60	14,74	58,68
	2	21,96	18,80	18,26	59,02
	3	23,12	19,20	18,30	60,62
	4	24,78	19,00	20,36	64,14

Cuadro 15. Ecuaciones de regresión y valores de 'R' entre el encalado con la producción de materia seca.

Suelo	X	Y	Ecuación de regresión	R ²
Colorado*	Encalado	Biomasa	$24,86 x^2 e^{-0,009 x}$	51,00
" **	"	"	$20,73 x^2 e^{-0,029 x}$	96,97
" ***	"	"	$18,73 x^2 e^{-0,010 x}$	83,78
" ****	"	"	$64,17 x^2 e^{-0,011 x}$	92,27
Instituto*	"	"	$22,28 x^2 e^{-0,010 x}$	19,85
" **	"	"	$15,28 x^2 e^{-0,042 x}$	81,44
" ***	"	"	$11,12 x^2 e^{-0,092 x}$	99,80
" ****	"	"	$48,47 x^2 e^{-0,042 x}$	89,53
Paraiso*	"	"	$23,71 x^2 e^{-0,031 x}$	13,08
" **	"	"	$18,17 x^2 e^{-0,006 x}$	99,76
" ***	"	"	$14,08 x^2 e^{-0,044 x}$	90,90
" ****	"	"	$55,94 x^2 e^{-0,012 x}$	93,11

* primer corte

** segundo corte

*** tercer corte

**** suma de los tres cortes

Cuadro 16. Resultado de los contrastes realizados para observar la influencia del encalado en la producción de materia seca.

Contrastes	Primer corte	Segundo corte	Tercer corte	Suma de los cortes
Colorado T vs resto	6,19 *	297,56 **	25,26 **	61,45 **
Colorado 2 + 4 vs 3	2,62 ns	0,48 ns	4,69 *	0,22 ns
Colorado 2 vs 4	1,82 ns	8,92 **	4,00 *	11,97 **
Colorado 1 vs 2 + 3 + 4	1,53	5,33 *	0,60 ns	1,00 ns
Instituto T vs resto	0,01 ns	2,45 ns	2,81 ns	3,10 ns
Instituto 2 + 4 vs 3	0,04 ns	1,55 ns	0,06 ns	0,54 ns
Instituto 2 vs 4	0,15 ns	1,95 ns	16,15 **	5,99 *
Instituto 1 vs 2 + 3 + 4	2,46 ns	4,97 *	12,02 **	14,58 **
Paraíso T vs resto	0,64 ns	11,83 **	19,25 **	12,85 **
Paraíso 2 + 4 vs 3	0,03 ns	0,05 ns	2,11 ns	0,42 ns
Paraíso 2 vs 4	3,35 ns	0,01 ns	6,68 *	5,40 *
Paraíso 1 vs 2 + 3 + 4	2,67 ns	0,09 ns	20,94 **	1,81 ns

Cuadro 17. Cuadrados medios de los análisis de varianza de la producción de materia seca, en los tres cortes.

F. V.	G. L.	Cuadrados medios			
		1º corte	2º corte	3º corte	Total
Tratamiento	14	10,860 ns	92,031**	59,608**	334,732**
Error	60	5,927	6,191	3.777	17,818
Total	74	---	---	---	---

ns no significativo

** significativo al 1%

Cuadro 18. Concentración de fósforo absorbido (%) por las plantas de sorgo correspondiente a los tres cortes y el total.

Suelo	Tratamiento	1º corte	2º corte	3º corte	Total
Colorado	0	0,28	0,11	0,23	0,62
	1	0,35	0,10	0,32	0,76
	2	0,31	0,10	0,34	0,74
	3	0,32	0,11	0,41	0,83
	4	0,21	0,10	0,33	0,63
Instituto	0	0,24	0,14	0,28	0,65
	1	0,25	0,14	0,37	0,75
	2	0,26	0,15	0,40	0,80
	3	0,24	0,15	0,47	0,85
	4	0,20	0,14	0,42	0,75
Paraiso	0	0,21	0,14	0,37	0,72
	1	0,20	0,15	0,43	0,78
	2	0,26	0,18	0,48	0,90
	3	0,28	0,16	0,41	0,84
	4	0,26	0,16	0,40	0,82

Cuadro 19. Ecuaciones de regresión y valores de 'R' entre el en-
calado con la absorción de fósforo por las plantas.

Suelo	E	X	Y	Ecuación de regresión	R ²
Colorado*	Encalado	'P'	0,280	+ 0,035x - 0,0053 x ²	85,74
" **	"	"	0,105	+ 0,002x - 0,0002 x ²	11,36
" ***	"	"	0,223	+ 0,049x - 0,0043 x ²	79,42
" ****	"	"	0,603	+ 0,084x - 0,0094 x ²	69,79
Instituto*	"	"	0,229	+ 0,021x - 0,0043 x ²	95,46
" **	"	"	0,131	+ 0,011x - 0,0019 x ²	83,80
" ***	"	"	0,283	+ 0,081x - 0,0097 x ²	96,76
" ****	"	"	0,649	+ 0,115x - 0,0163 x ²	99,88
Paraiso*	"	"	0,198	+ 0,014x - 0,0007 x ²	75,97
" **	"	"	0,131	+ 0,013x - 0,0012 x ²	77,87
" ***	"	"	0,362	+ 0,039x - 0,0041 x ²	85,02
" ****	"	"	0,701	+ 0,062x - 0,0055 x ²	83,71

* primer corte

** segundo corte

*** tercer corte

**** suma de los tres cortes

Cuadro 20. Cuadrados medios de los análisis de varianza de la absorción de fósforo por las plantas.

F. V.	G. L.	Cuadrados medios			
		1º corte	2º corte	3º corte	Total
Tratamiento	14	0,0091**	0,0030**	0,0226**	0,0348**
Error	60	0,0030	0,0007	0,0029	0,0080
Total	74	----	----	----	----

** significativo al 1%

Cuadro 21. Resultado de los contrastes para observar la influencia del encalado en la absorción de fósforo por las plantas.

Contrastes	Primer corte	Segundo corte	Tercer corte	Suma de los cortes
Colorado T vs resto	0,27 ns	0,74 ns	19,07 **	7,97 **
Colorado 2 + 4 vs 3	3,39 ns	0,87 ns	6,59 *	8,72 **
Colorado 2 vs 4	6,57 *	0,06 ns	0,08 ns	3,36 ns
Colorado 1 vs 2 + 3 + 4	5,19 *	0,43 ns	2,41 ns	0,11 ns
Instituto T vs resto	0,00 ns	0,49 ns	23,50 **	9,69 **
Instituto 2 + 4 vs 4	0,08 ns	0,00 ns	3,42 ns	1,81 ns
Instituto 2 vs 4	2,36 ns	1,25 ns	0,05 ns	0,78 ns
Instituto 1 vs 2 + 3 + 4	0,17 ns	0,00 ns	3,84 ns	1,05 ns
Paraiso T vs resto	2,07 ns	3,85 ns	5,35 *	8,03 **
Paraiso 2 + 4 vs 3	0,43 ns	0,62 ns	0,50 ns	0,09 ns
Paraiso 2 vs 4	0,05 ns	0,97 ns	5,21 *	2,30 ns
Paraiso 1 vs 2 + 3 + 4	5,08 *	0,74 ns	0,00 ns	2,89 ns

Cuadro 22. Acidez, contenido de cationes y C.I.C. obtenidos con diferentes encalados. Antes de la siembra del sorgo y después del período de incubación con cal.

Suelo	Trat.*	pH			meq/100g de suelo					Saturación (%)**
		H ₂ O	KCl	C.I.C.	Ca	Mg	K	Na	Al+H	
Colorado	0	4,8	4,1	23,1	2,60	1,22	0,85	0,17	1,57	75,5
	2,5	5,0	4,3	23,7	4,25	1,38	0,85	0,15	0,74	90,0
	5,0	5,2	4,5	24,5	5,97	1,36	0,86	0,17	0,36	96,0
	6,5	5,4	4,6	26,1	8,18	1,33	0,85	0,17	0,22	98,0
	8,0	5,6	4,8	28,1	8,55	1,27	0,96	0,17	0,19	98,3
Instituto	0	4,9	4,1	26,8	2,56	1,08	0,63	0,14	0,83	84,2
	1,0	5,1	4,3	26,3	3,44	1,01	0,62	0,14	0,52	91,0
	2,0	5,2	4,4	27,0	4,17	1,06	0,63	0,15	0,42	93,5
	4,0	5,5	4,8	28,4	6,15	1,06	0,63	0,14	0,24	97,0
	6,0	5,7	5,0	30,4	7,92	1,05	0,63	0,14	0,13	98,7
Paraiso	0	4,7	3,8	30,1	3,24	2,09	0,37	0,22	1,31	82,0
	2,0	4,8	4,0	29,7	4,46	2,10	0,37	0,21	0,78	90,2
	4,0	5,0	4,2	31,6	7,58	2,08	0,37	0,21	0,39	96,3
	7,0	5,3	4,3	33,4	10,84	1,94	0,37	0,22	0,26	98,1
	9,0	5,4	4,6	33,8	12,90	1,99	0,38	0,23	0,20	98,7

* Contenido en meq de Ca/100g de suelo.

** Calculado basado en suma de bases.

Cuadro 23. Acidez, contenido de cationes y C.I.C. obtenidos con diferentes encalados. Datos para después del último corte del cultivo de sorgo.

Suelo	Trat.*	pH		meq/100g de suelo						Saturación (%)**
		H ₂ O	KCl	C.I.C.	Ca	Mg	K	Na	Al+H	
Colorado	0	4,5	3,6	21,3	2,14	0,57	0,42	0,59	2,70	58,0
	2,5	4,8	3,7	22,1	4,36	0,54	0,30	0,64	2,00	74,5
	5,0	4,9	3,8	23,8	6,30	0,72	0,30	0,75	1,12	87,8
	6,5	5,1	4,0	25,2	7,81	0,79	0,24	0,79	0,70	93,2
	8,0	5,3	4,2	25,9	8,08	0,86	0,18	0,80	0,44	96,8
Instituto	0	4,1	3,7	25,0	1,72	0,47	0,50	0,63	2,25	59,6
	1,0	4,2	3,8	25,9	1,90	0,52	0,58	0,60	2,13	62,8
	2,0	4,4	3,9	25,1	2,48	0,55	0,45	0,62	1,73	70,3
	4,0	4,9	4,1	26,5	4,04	0,60	0,37	0,74	0,98	86,4
	6,0	5,0	4,2	28,0	5,06	0,80	0,36	0,74	0,73	90,5
Paraiso	0	4,5	3,7	24,0	2,76	0,70	0,43	0,69	1,88	71,0
	2,0	4,7	3,8	25,0	4,36	0,83	0,40	0,87	1,32	83,0
	4,0	4,8	3,9	25,8	5,20	1,10	0,40	0,92	0,80	90,5
	7,0	5,0	4,1	27,2	7,98	1,12	0,26	0,73	0,50	95,3
	9,0	5,3	4,2	32,6	8,26	1,38	0,24	0,98	0,42	96,3

* Contenido en meq de Ca/100g de suelo

** Calculado basado en suma de bases

Cuadro 24. Biomasa del sorgo y su contenido mineral, primer corte (después de un abonamiento nitrogenado).

Suelo	Trat.*	% NUTRIMENTOS				BIOMASA	
		P	K	Ca	Mg	P.V.	P.S.
Colorado	0,0	0,28	3,68	0,34	0,29	194,00	21,78
	2,5	0,35	3,49	0,44	0,42	226,32	25,98
	5,0	0,31	3,85	0,54	0,49	206,28	24,10
	6,5	0,32	3,88	0,64	0,53	195,38	22,98
	8,0	0,21	3,57	0,61	0,51	205,82	26,18
Instituto	0,0	0,24	3,37	0,44	0,33	180,32	22,80
	1,0	0,25	3,55	0,48	0,34	181,28	21,46
	2,0	0,26	3,29	0,54	0,46	183,14	23,64
	4,0	0,24	3,22	0,55	0,46	185,68	23,62
	5,0	0,20	3,29	0,66	0,46	176,28	23,08
Paraiso	0,0	0,21	2,78	0,35	0,44	186,80	24,78
	2,0	0,20	2,70	0,46	0,53	189,48	25,34
	4,0	0,26	2,60	0,48	0,53	160,92	21,96
	7,0	0,28	2,53	0,61	0,63	169,08	23,12
	9,0	0,26	2,41	0,61	0,61	183,58	24,78

* Contenido del Ca en meq/100g de suelo

Cuando 25. Biomasa del sorgo y su contenido mineral, segundo corte (después de un abonamiento completo).

Suelo	Trat.*	% NUTRIMENTOS				BIOMASA	
		P	K	Ca	Mg	P.V.	P.S.
Colorado	0,0	0,11	1,60	0,48	0,31	129,2	17,4
	2,5	0,10	1,02	0,54	0,43	138,8	23,8
	5,0	0,10	1,16	0,58	0,47	147,8	24,2
	6,5	0,11	1,16	0,64	0,54	161,0	27,4
	8,0	0,10	0,94	0,63	0,55	166,0	28,8
Instituto	0,0	0,14	1,14	0,51	0,33	91,2	15,6
	1,0	0,14	1,15	0,70	0,44	106,2	15,4
	2,0	0,15	1,14	0,72	0,52	114,7	16,6
	4,0	0,15	1,09	0,73	0,57	126,0	19,4
	6,0	0,14	1,01	0,84	0,49	118,4	18,8
Paraiso	0,0	0,14	0,63	0,46	0,63	92,0	14,6
	2,0	0,15	0,59	0,68	0,65	111,2	18,6
	4,0	0,18	0,73	0,75	0,71	118,2	18,8
	7,0	0,16	0,77	0,83	0,77	126,0	19,2
	9,0	0,16	0,58	0,76	0,74	127,4	19,0

* Contenido de Ca meq/100g de suelo

Cuadro 26. Biomasa del sorgo y su contenido mineral, tercer corte.

Suelo	Trat.*	% NUTRIMENTOS				BIOMASA	
		P	K	Ca	Mg	P.V.	P.S.
Colorado	0	0,23	2,53	0,43	0,26	129,56	16,12
	2,5	0,32	2,18	0,46	0,29	151,94	20,42
	5,0	0,34	2,38	0,56	0,38	154,40	19,20
	6,5	0,41	2,29	0,61	0,43	167,02	22,74
	8,0	0,33	2,23	0,62	0,43	163,28	21,66
Instituto	0	0,28	2,46	0,47	0,30	104,20	13,06
	1	0,37	2,38	0,58	0,40	92,44	12,08
	2	0,40	2,72	0,56	0,41	112,02	13,18
	4	0,47	2,74	0,59	0,44	123,08	15,38
	6	0,42	2,38	0,59	0,39	136,98	18,12
Paraiso	0	0,37	2,43	0,42	0,37	114,42	13,92
	2	0,43	2,34	0,48	0,41	121,78	14,74
	4	0,48	2,38	0,48	0,38	131,42	18,26
	7	0,41	2,42	0,57	0,45	137,54	18,30
	9	0,40	2,35	0,59	0,56	159,40	20,36

* Contenido de Ca en meq/100g de suelo

Cuadro 27. Reacción del Suelo (pH) correspondiente a las etapas del experimento

Suelo	Trat.	30 días después del encalado		Después del 1º corte		Después del 2º corte		Después del 3º corte	
		pH H ₂ O	pH KCl	pH H ₂ O	pH KCl	pH H ₂ O	pH KCl	pH H ₂ O	pH KCl
Colorado	0	4,76	4,08	4,54	3,78	4,76	3,70	4,52	3,62
	1	5,00	4,30	5,02	4,10	5,02	3,90	4,80	3,76
	2	5,22	4,50	5,36	4,44	5,26	4,16	4,90	3,82
	3	5,36	4,64	5,40	4,60	5,52	4,36	5,10	4,02
	4	5,56	4,80	5,72	4,90	5,64	4,48	5,32	4,16
Instituto	0	4,90	4,12	4,88	4,02	4,82	3,80	4,14	3,72
	1	5,06	4,32	5,08	4,24	5,00	3,90	4,20	3,76
	2	5,12	4,40	5,10	4,30	5,26	4,04	4,38	3,86
	3	5,48	4,76	5,40	4,56	5,44	4,26	4,84	4,08
	4	5,72	5,00	5,62	4,76	4,60	4,38	4,92	4,18
Paraiso	0	4,68	3,80	4,88	3,72	--	--	4,48	3,69
	1	4,84	3,98	5,04	3,96	--	--	4,69	3,78
	2	5,02	4,18	5,18	4,16	--	--	4,80	3,90
	3	5,30	4,34	5,62	4,59	--	--	5,00	4,06
	4	5,42	4,56	5,92	4,90	--	--	5,26	4,16