

EVALUACION DEL AZUFRE DISPONIBLE EN ALGUNOS SUELOS
AGRICOLAS DE COSTA RICA

Tesis de Grado de
MAGISTER SCIENTIAE

ARIDIO PEREZ ABREU



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales
Turrialba, Costa Rica
Junio, 1974

EVALUACION DEL AZUFRE DISPONIBLE EN ALGUNOS SUELOS
AGRICOLAS DE COSTA RICA

Tesis

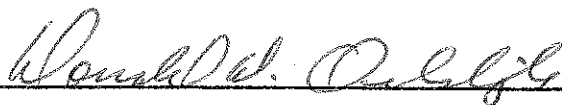
Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados
como requisito parcial para optar al grado de

Magister Scientiae

en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:



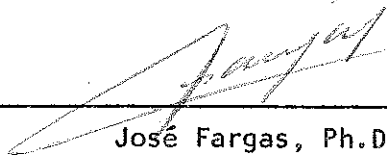
Donald D. Oelstigle, Ph.D.

Consejero



Rufo Bazán, Ph.D.

Comité



José Fargas, Ph.D.

Comité



Adalberto Gorbitz, Ing. Agr.

Comité

Junio, 1974

DEDICATORIA

A la memoria de mi madre (q.e.p.d.)

A Ligia con cariño

A mi padre

A mis hermanos

AGRADECIMIENTO

El autor desea dejar constancia de agradecimiento al Dr. Donald D. Oelsligle, Consejero Principal, por la acertada orientación y estrecha colaboración en el planeamiento y desarrollo del presente trabajo.

A los Dres. Rufo Bazán y José Fargas, por sus atinadas sugerencias para mejorar el trabajo.

Al Ing. Adalberto Gorbitz, por su colaboración en la revisión del original.

A los Dres. Rensó Scavazzon y Romain De Cock y al Ing. Emilio Peralta, por su desinteresada y muy valiosa ayuda, la cual hizo posible la conclusión de sus estudios de postgrado.

Al Ing. Alvaro Cordero, por su ayuda en la selección y recolección de los suelos empleados en el estudio.

Agradece de manera especial a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), al Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, al Proyecto de Diversificación y Aumento de la Producción Agrícola en el Valle del Cibao, por haberle otorgado la beca, facilidades de uso de laboratorio e instrumental y licencia en comisión de estudios, respectivamente, que hicieron posible sus estudios y desarrollo de trabajo de investigación.

BIOGRAFIA

El autor nació en La Gina, Villa Tapia, Provincia Salcedo, República Dominicana. Los estudios secundarios los realizó en el Liceo Secundario Emiliano Tejera de la ciudad de Salcedo. Sus estudios universitarios los efectuó en la Escuela Superior de Agricultura Antonio Narro de la Universidad de Coahuila, Saltillo, Coahuila, México, donde obtuvo el título de Ingeniero Agrónomo en 1970. Ingresó en el mismo año a la Secretaría de Estado de Agricultura como contraparte en el Departamento de Fertilidad de Suelos y Prácticas Culturales del Proyecto de Diversificación y Aumento de la Producción Agrícola en el Valle del Cibao.

En setiembre de 1972 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, en Turrialba, Costa Rica, becado por la FAO para realizar estudios de postgrado en la especialidad de suelos, habiendo obtenido el grado de Magister Scientiae en junio de 1974.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 El azufre del suelo	3
2.2 Fuentes de azufre de los suelos	4
2.3 Factores que afectan la disponibilidad de azufre en los suelos	5
2.4 Requerimientos de azufre por los cultivos	6
2.5 Deficiencias de azufre en suelos	7
2.6 Predicciones de respuesta al azufre	8
2.7 Determinación analítica del azufre extraído	10
3. MATERIALES Y METODOS	11
3.1 Descripción general de los suelos y las áreas de muestreo	11
3.2 Preparación del material	19
3.3 Caracterizaciones físicas y químicas de los suelos	20
3.4 Extracción y determinación del azufre extraíble	21
3.5 Experimento de invernadero	22
3.6 Análisis estadístico de los resultados ...	26
3.7 Determinación del nivel crítico	26
4. RESULTADOS	28
4.1 Propiedades químicas de los suelos	28
4.2 Propiedades físicas de los suelos	30
4.3 Azufre extraído por los diferentes métodos	30
4.4 Estudio de invernadero	33
4.5 Evaluación de extractantes	40
5. DISCUSION	47
5.1 Propiedades químicas de los 30 suelos	47
5.2 Respuesta de los suelos al azufre	47
5.3 Evaluación de extractantes	50

	<u>Página</u>
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
7. RESUMEN	57
7a. SUMMARY	59
8. LITERATURA CITADA	60
APENDICE	66

LISTA DE CUADROS

<u>CUADRO N°</u>		<u>Página</u>
1	Datos climáticos, altitudes, zonas de vida, color y clasificación de las 30 muestras de suelos	12
2	Determinaciones físicas y químicas realizadas y los métodos empleados para caracterizar los 30 suelos	20
3	Extractantes usados para la determinación del azufre disponible en los 30 suelos de Costa Rica	21
4	Cantidades de nutrimentos (g/maceta y Kg/ha) aplicados en el invernadero a los 30 suelos de Costa Rica, usados en el experimento de azufre disponible	24
5	Características químicas de 30 suelos de Costa Rica (0-30 cm)	29
6	Textura, densidad aparente y humedad gravimétrica a 1/3 de bar de succión de 30 suelos de Costa Rica	31
7	Valores promedios de azufre extraído (ppm) por los varios métodos y sus medidas de variabilidad	32
8	Rendimientos promedios de materia seca, rendimientos relativos, concentración de azufre y azufre asimilado por el cultivo	35
9	Análisis de variancia de los rendimientos de materia seca de los tratamientos con y sin azufre en los 30 suelos	36
10	Análisis de variancia de las concentraciones de azufre en las plantas de los tratamientos con y sin azufre en los 30 suelos	37

CUADRO N°Página

11	Análisis de variancia del azufre asimilado por las plantas de los tratamientos con y sin azufre	37
12	Coefficientes de correlación lineal entre los extractantes probados y los rendimientos relativos de materia seca y el azufre asimilado por el sorgo	40
13	Coefficientes de determinación de diferentes modelos relacionando el azufre extraído de los cuatro métodos con los rendimientos relativos de materia seca	41

APENDICE

1	Ecuaciones propias para cada modelo con los diferentes métodos de extracción: en donde \hat{Y} = valor estimado del rendimiento relativo y X = azufre extraído	67
2	Contenido de fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio de los suelos La Piñera-3, Volcán-4, Vara Blanca-18, Sanatorio Durán-21, Fundo La Fuente-22 y Juan Viñas-23, en las profundidades de las macetas comprendidas entre 0-5, 5-10 y 10-15 cm, analizados después de la cosecha	68

LISTA DE FIGURAS

<u>FIGURA N°</u>		<u>Página</u>
1	Localización de los sitios de muestreo de 30 suelos de Costa Rica usados en el estudio de evaluación del azufre disponible	13
2	Aspecto general del ensayo a los 35 días de edad de las plantas	34
3	Apariencia de las plantas de los tratamientos con (+S) y sin (-S) azufre, cultivadas en el suelo Bagaces a los 35 días de edad	34
4	Relación entre el azufre extraído de los suelos por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$ y los rendimientos relativos de materia seca	43
5	Relación entre el azufre extraído de los suelos por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y los rendimientos relativos de materia seca	44
6	Relación entre el azufre extraído de los suelos por el método de KH_2PO_4 y los rendimientos relativos de materia seca	45
7	Relación entre el azufre extraído de los suelos por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$ y los rendimientos relativos de materia seca	46

1. INTRODUCCION

El azufre es un componente básico de proteínas, enzimas, vitaminas y otros compuestos de los vegetales, por lo cual reviste una gran importancia como nutrimento en la mayoría de los vegetales y de los animales. El suelo es la fuente principal de donde las plantas se abastecen de este elemento, razón por la que para un desarrollo óptimo de las plantas, se necesita que dicho nutrimento se encuentre disponible en cantidades adecuadas.

Algunos investigadores han encontrado que este elemento se encuentra en cantidades deficitarias en ciertas áreas agrícolas de la América Tropical (19, 20, 21, 57, 66). Esta situación, en la actualidad, ha empeorado por el uso continuo de materiales fertilizantes de alto análisis y el uso intensivo de los suelos.

Algunos investigadores han tratado de encontrar una metodología rápida y económica que permita determinar las necesidades de nutrimento de cultivos que permita en un corto tiempo caracterizar algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, las cuales pueden asociarse con los resultados obtenidos en la experimentación de invernadero o de campo. En la actualidad, los análisis químicos de suelos están aceptados como una base para hacer recomendaciones de fertilizantes, y predecir deficiencias nutritivas. Sin embargo, dichos métodos en algunos casos no han sido muy satisfactorios en su capacidad predictiva. Esto podría atribuirse, en parte, a la falta de estudio de correlación entre cantidades de nutrimentos requeridos por los cultivos y las cantidades extraídas del suelo por el método químico considerado bajo condiciones propias.

Según Hoefl y colaboradores (37), todos los métodos de extracción propuestos para estimar el azufre disponible de los suelos del mundo han sido limitados. En Costa Rica no existen estudios publicados de correlación entre métodos de análisis de suelos y respuesta de cultivos al azufre aplicado.

Basado en todo lo expuesto, se realizó la presente investigación con suelos de zonas agrícolas de Costa Rica, cuyos objetivos fueron los siguientes:

1. Evaluar varios métodos de extracción de azufre disponible
2. Determinar si algunos de los suelos de zonas de importancia agrícola de Costa Rica tienen deficiencia de azufre.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 El azufre del suelo

El azufre total del suelo indica la reserva de este elemento que puede ser convertida por acción química o bacteriana a las formas más rápidamente aprovechables por las plantas, y su ámbito en la mayoría de los suelos está entre 0,012 y 0,05 por ciento (7). Muchas rocas ígneas contienen entre 0,05 y 0,3 por ciento de azufre, principalmente como sulfuro de hierro, níquel y cobre. Las rocas ígneas básicas generalmente tienen un contenido más alto que las de tipo ácido, y el contenido de sulfatos de algunas rocas sedimentarias es con frecuencia apreciable (76).

En los suelos inorgánicos el contenido de azufre total varía entre 0,02 y 0,2 por ciento (69), encontrándose este nutrimento en la mayor parte de los terrenos arables acomplexado en la materia orgánica, como sulfatos solubles en la solución del suelo, o adsorbido en el complejo coloidal (70).

Massoumi y Cornfield (49), con base en los análisis de numerosas muestras de suelos encontraron que el azufre total oscilaba entre 0,012 y 0,17 por ciento y Whitehead (76), en varios suelos del mundo, encontró valores que fluctuaban entre 0,002 a 0,35 por ciento. En suelos derivados de cenizas volcánicas en Chile, Schalscha et al (67) dan valores para el azufre total comprendidos entre 0,03 y 0,11 por ciento. Para suelos de Turrialba, Costa Rica, Granados (31) registra que el azufre total fluctúa entre 0,24 y 0,34 por ciento. Blasco (10), para suelos de Centro América, da valores de azufre total que oscilan entre 0,04 y 0,23 por ciento.

El azufre orgánico, que principalmente forma parte de las sulfoproteínas, constituye una fracción importante del azufre total en los suelos húmicos (48). También el azufre orgánico, según Bandsley y Lancaster (5), constituye la mayor parte del azufre del suelo superficial de las regiones húmedas. En suelos de Canadá, Lowe (48) encontró que las formas orgánicas de azufre predominan en toda la superficie y horizonte B. Según Freney (32), el azufre orgánico equivale al 90-98 por ciento del azufre total en suelos de Australia, mientras que Lowë y De-long (49) indican que en algunos suelos de la provincia de Quebec, Canadá, la fracción orgánica del azufre varía entre 33 y 70 por ciento. McClung et al (55) dan cifras de 0,01 a 0,025 por ciento para suelos del Brasil. En suelos volcánicos de Colombia, según Domínguez y Rodríguez (26), el valor promedio del azufre orgánico era equivalente a 22,7 por ciento. Los valores de azufre orgánico en suelos de Costa Rica están entre 38-60 por ciento (48). Blasco (10) encontró que en general los suelos de Centro América estudiados tenían 35 por ciento de azufre orgánico.

2.2 Fuentes de azufre de los suelos

Las fuentes principales de azufre para los suelos las constituyen los sulfatos como yeso ($\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la anhidrita (Ca SO_4), así como algunos sulfuros tales como piritita (Fe S_2), pirotita (FeS), esfalerita (Zn S) y calcopirita (Cu Fe S_2) (50,69).

Otra fuente de azufre en los suelos es la incorporada por el agua de lluvia, que disuelve el SO_2 que se encuentra en la atmósfera como producto de algunos materiales combustibles utilizados en industrias

de diversas ramas. Crocker (23) señala cantidades superiores a 5 kg/ha/año como aporte de azufre a los suelos próximos a zonas industriales, hecho por esta fuente.

La fertilización constituye otra fuente de azufre para los suelos. Cuando se agregan compuestos tales como polisulfuro de amonio, sulfato de amonio, sulfato de potasio y superfosfato simple, se incorporan cantidades apreciables de azufre a los suelos. Estos fertilizantes pueden satisfacer, en muchos casos, las necesidades de la nutrición vegetal (9, 23).

Prácticas agrícolas como el empleo de insecticidas y fungicidas para el control de plagas y enfermedades de los cultivos incorporan con frecuencia pequeñas cantidades de azufre.

2.3 Factores que afectan la disponibilidad de azufre en los suelos

El azufre puede ser inmovilizado en los suelos en que la proporción de carbono o de nitrógeno con respecto al azufre no es muy amplia, encontrándose las relaciones C:N:S de la mayoría de los suelos en un ámbito de 113:10:1,27 - 145:10:1,01 (70,76). Mattson, citado por Kamprath et al (47) demostró que cuando en el suelo había alto contenido de óxido de hierro el azufre era removido de la solución. Overstreet y Dean, citados por Kamprath et al (47), encontraron que el mecanismo de retención de los iones Cl^- , SO_4^{2-} y PO_4^{3-} en suelos ácidos es similar. Los fosfatos del suelo reemplazan al SO_4^{2-} , por tanto, cuando la concentración de PO_4^{3-} aumenta la de SO_4^{2-} disminuye, así como la absorción de éste por las plantas se reduce (47).

La solubilidad de los iones SO_4^{2-} ocasionan pérdidas por lavado en proporciones que superan a las requeridas por los cultivos (23, 61).

Chao y otros (16) encontraron que el volumen del agua de lavado que recibe el suelo, el encalado y la aplicación de PO_4^{3-} aumentan las pérdidas de azufre; según estos autores, el encalado a razón de cuatro toneladas/ha de CaCO_3 provoca importantes pérdidas.

Las lluvias de las regiones tropicales efectúan una sustancial remoción de SO_4^{2-} de los suelos (23). Se estima como promedio 45 kg/ha/año la cantidad perdida por lavado.

En Costa Rica, Ramos (61), estudiando las pérdidas de aniones por el suelo en lisímetro, encontró que las pérdidas de SO_4^{2-} son muy variables, dependiendo principalmente del tipo de suelo; así, suelos volcánicos perdieron hasta un 88 por ciento del SO_4^{2-} agregados a los lisímetros, en cambio los lateríticos perdieron menos del 10 por ciento.

Chao et al (17) han demostrado que el calcio favorece la retención de SO_4^{2-} en comparación con el potasio y el sodio.

2.4 Requerimientos de azufre por los cultivos

El azufre es un elemento esencial en la nutrición de la planta y requerido por ésta en aproximadamente las mismas proporciones que el fósforo para la formación de ciertos aminoácidos (9). Este nutrimento es de lenta movilidad en los tejidos de los vegetales, por lo cual el síntoma de deficiencia aparece primeramente en las hojas más jóvenes, manifestándose por un color amarillento, que al irse generalizando aparece también en las hojas viejas (24).

Los requerimientos de azufre por los cultivos son muy variables, dependiendo de la especie de planta cultivada y la edad de la misma. Según Kamprath et al (47), el algodón y la soya consumen considerablemente más azufre que los cultivos de tabaco y maíz. Asimismo, el

contenido de azufre de este último no cambia con la edad, mientras que en los cultivos de algodón, soya y tabaco, el contenido de azufre decrece con la edad.

Según los valores citados por Chapman (13) y Martín y Walker (52), la concentración óptima de azufre para algunas leguminosas está en un ámbito entre 0,22 y 0,60 por ciento, mientras que en general en las gramíneas esta concentración está más baja variando entre 0,10 - 0,22 por ciento.

El azufre removido del suelo por los cultivos varía con la cantidad disponible en el suelo, tipo de planta y los rendimientos de la misma. Así, vemos que una cosecha de alfalfa con un rendimiento de 1680 kg/ha remueve unos 3,5 kg/ha, mientras que con rendimiento de 3750 kg/ha puede extraer del suelo hasta 13,0 kg/ha (52). Por lo que respecta a una gramínea, un rendimiento de 4000 kg/ha de grano de sorgo extrae del suelo 5 kg de azufre por hectárea (58).

2.5 Deficiencias de azufre en suelos

Muchas son las zonas del mundo en donde se han encontrado deficiencias de azufre. En América concretamente, se han registrado deficiencias en suelos de América Central, Argentina, Brasil, Canadá y Estados Unidos (20). Muller (57) en 1964, trabajando en invernadero y usando como planta indicadora el tomate, detectó deficiencia de azufre en suelos de El Salvador, mientras que Cordero y Salas (20, 21), evaluando la fertilidad de suelos de Guanacaste y del Pacífico Sur, por medio de microparcelas de maíz, detectaron deficiencias de azufre en suelos de Costa Rica. En un ensayo de invernadero, empleando soya como

indicador en un suelo de Santa Cruz, Guanacaste, Salinas (66) encontró que el azufre puede ser un factor crítico en esta zona.

Estudiando el metabolismo del azufre en suelos del Pacífico de Nicaragua, Burbano (14) consideró que los niveles de azufre disponible en esta región, eran bajos, sugiriendo que para obtener rendimientos óptimos, se necesita una fertilización con compuestos azufrados.

2.6 Predicciones de respuesta al azufre

Los extractantes que remueven las porciones de azufre rápidamente solubles, porciones de sulfatos adsorbidos, y formas del azufre orgánico de los suelos, son los que proveen las mejores predicciones de respuesta en ensayos de campo e invernadero (64). Además de las formas extraídas, es necesario, al seleccionar un extractante de azufre para predecir respuestas, tomar en cuenta la reacción del extractante con diferentes suelos y la facilidad analítica del extracto. También para ser útil en análisis rutinario, un extractante debería presentar un filtrado claro, especialmente cuando se usa la metodología turbidimétrica para la determinación de azufre (64).

Numerosos procedimientos han sido propuestos para evaluar el estado del azufre en los suelos. Los procedimientos han incluido extracción con varias sales y ácidos, crecimiento microbial, crecimiento y composición de plantas y determinaciones del valor "A" (64). Jackson (41) utiliza la solución Morgan (acetato de sodio y ácido acético). Beaton et al (8) reportan el uso de la solución de Bardsley y Lancaster (acetato de amonio 0,1 N y ácido acético 0,5 N a pH 4,6); la solución de Ensminger (fosfato monopotásico 500 ppm de P), el ácido

clorhídrico a varias concentraciones, el carbonato de amonio y de calcio 1N. Reisenauer et al (64) reportan que el cloruro de calcio extrae los sulfatos solubles, mientras que el fosfato de calcio ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) y el fosfato de potasio ($\text{K H}_2\text{PO}_4$) extraen los sulfatos solubles más los sulfatos absorbidos. Según estos autores el fosfato de sodio ($\text{Na H}_2\text{PO}_4$) en ácido acético 2N extrae los sulfatos solubles más proporciones de sulfatos absorbidos y porciones del azufre orgánico, de igual manera se comporta el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ en ácido acético 2N.

Jones et al (45), trabajando con suelo de Inglaterra y Gales, estudiaron la disponibilidad de azufre para las plantas usando como soluciones extractoras cloruro de calcio 0,1 M para la fracción soluble y fosfato de potasio con 500 ppm de P para las fracciones solubles y absorbidas. En este estudio se empleó una relación suelo-solución extractora 1:5 y se encontró una buena correlación (0,94) entre el azufre extraído por el fosfato de potasio y el azufre disponible para las plantas, mientras que con el CaCl_2 no hubo correlación (42).

Hoeft et al (37), con 49 suelos de Wisconsin, Estados Unidos, evaluaron varios extractantes de azufre utilizando como cultivo la alfalfa. Los extractantes usados fueron fosfato de calcio con 500 ppm de P en ácido acético 2N, fosfato de sodio 0,03 M en ácido acético 2N, cloruro de calcio 0,025 N, solución Bray I y el ácido fosfórico 0,1N. La relación suelo-solución extractora fue de 1:2,5 y se determinó el azufre por el método modificado de Maussoumi y Cornfield. Se encontraron buenas correlaciones para fosfato de calcio-ácido acético 2N, fosfato de calcio, y el cloruro de calcio con el azufre asimilado por el

cultivo de la alfalfa, no así para el ácido fosfórico y Bray I.

2.7 Determinación analítica del azufre extraído

Para determinar el azufre extraído existen varias técnicas. Ulrich et al (71) describen el método del azul de metileno para su determinación mientras que Beaton, Burns y Platou, citados por Reisenauer et al (64) utilizaron la turbidimetría, gravimetría, nefelometría, tintimetría, colorimetría, rayos X y espectrofotometría de absorción atómica. Además, para la determinación de azufre, Walker et al (74) han usado el método de isótopos radiactivos. Aún cuando existen una gran variedad de métodos analíticos, el más ampliamente usado hasta el momento es la turbidimetría.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción general de los suelos y las áreas de muestreo

La selección de las áreas y suelos por estudiar se basó en las recomendaciones hechas por el personal del Ministerio de Agricultura y Ganadería, encargado de realizar las investigaciones de fertilidad de suelos en Costa Rica. Esta selección se realizó tomando en cuenta la importancia agrícola de la región, tratando de escoger en cada zona un suelo representativo de la misma.

Los suelos utilizados en el presente estudio pertenecen a una gama muy variada de condiciones químicas, físicas, ecológicas y de uso de la tierra. En el Cuadro 1 se anotan las principales características de cada localidad y en la Figura 1 se localizan los lugares muestreados.

Caracol-1: Este suelo aluvial fue colectado a unos cinco kilómetros al norte de la localidad de Villa Neily, provincia de Puntarenas, en la finca del señor Ricardo Neily, con una pendiente aproximada de 2 por ciento, drenaje superficial bueno y napa freática a 1,80 m, aproximadamente. La zona está sometida a un período prolongado de sequía (3-4 meses al año) y los cultivos básicos de la región son el arroz, banano, palma aceitera, sorgo y pasto.

Palmar Sur-2: Este suelo, también aluvial, fue colectado en el lote propiedad del Ing. Arnoldo Romero, que se caracteriza por ser un terreno plano con pendiente de ± 2 por ciento, de topografía plana y con

Cuadro 1. Datos climáticos, altitudes, zonas de vida, color y clasificación de las 30 muestras de suelo.

Nº	Suelo	Nombre	Altitud m/±m.	Precipitación mm/año*	Temp. media °C*	Ests. meteo- rológicas*	Color suelo seco	Clasificación suelos**	Refe- tencias	Zonas de Vida (38)
1	Ceracol		30	2646,0	27,4	Coto 26	10YR 5/4	Entisol	(35)	BHHT
2	Palmar Sur		20	3382,0	27,4	Palmar Sur	10YR 4/3	Entisol	(35)	BMHP
3	La Piñera		450	2681,0	21,5	La Piñera	10YR 3/3	Ultisol	(2)	ETP
4	Volcán		500	3490,0	26,3	Volcán Bs. Aires	10YR 3/3	Ultisol	(2)	ETP
5	Buena Vista		20	3902,0	---	Quepos	10YR 5/4	Entisol	(35)	BTMH
6	Finca Ligia		30	3319,0	---	Parritas	10YR 5/4	Entisol	(35)	BHT
7	Santa Rosa		50	1853,0	27,0	Liberia	10YR 5/2	Entisol	(35)	BHP
8	La Flor		50	1853,0	27,0	Liberia	10YR 4/1	Entisol	(35)	BHP
9	Los Angeles		100	1853,0	27,0	Liberia	10YR 3/2	Alfisol	(35)	BST
10	Bagaces		---	1853,0	27,0	Liberia	10YR 4/1	Alfisol	(35)	BSTTB
11	La Ceiba		---	1853,0	27,0	Liberia	10YR 4/1	Alfisol	(35)	BSTTB
12	Taboga		50	1853,0	27,3	Liberia	10YR 3/2	Alfisol	(35)	BST
13	Liberia		150	1853,0	27,3	Liberia	10YR 6/2	Entisol	(35)	BST
14	C. Blanca		---	2303,0	---	Upala	10YR 4/4	Ultisol	(35)	BMHT
15	Guachipelín		---	1678,0	20,6	Sta. Ana	10YR 2/1	Alfisol	(35)	BHP
16	C. Victoria		1000	2499,0	21,6	Naranjo	10YR 4/4	Entisol	(35)	BMHP
17	La Argentina		800	2330,0	22,6	La Argentina	10YR 4/2	Ultisol	(35)	BMHT
18	V. Blanca		1900	3020,0	---	S. Diego del Roble	10YR 3/3	Inceptisol	(35)	BHP
19	S. Josecito		---	3269,0	27,2	Los Llanos	10YR 3/4	Ultisol	(6)	BHTB
20	Pital		---	3269,0	27,2	Los Llanos	10YR 3/4	Ultisol	(6)	BMHPTB
21	S. Durán		2200	2160,0	14,0	Sanat. Durán	10YR 4/2	Inceptisol	(35)	BHMB
22	La Fuente		1500	2278,0	17,3	Pacayas	10YR 3/2	Inceptisol	(1)	BHP
23	Juan Viñas		---	2278,0	17,3	Pacayas	10YR 3/1	Inceptisol	(1)	BSTMH
24	V. Turrialba		2400	3304,0	10,8	Coliblanco	10YR 3/2	Inceptisol	(35)	BPM
25	La Lola		50	3268,0	---	Siquirres	10YR 4/4	Entisol	(42)	BMHPTB
26	Bataán		50	3268,0	---	Siquirres	10YR 5/4	Entisol	(42)	BMHPTB
27	Aeropuerto		800	1882,0	22,6	El Coco	10YR 3/3	Ultisol	(35)	BHP
28	Nicoya		130	2233,0	27,5	Nicoya	10YR 3/4	Alfisol	(35)	BHP
29	Jicaral		30	2233,0	27,5	Nicoya	10YR 3/1	Alfisol	(35)	BHPTB
30	Colorado		650	2237,0	22,2	IICA	10YR 3/4	Inceptisol	(1)	BMHP

* Tomados de Tabulación para uso agrícola de los datos climáticos de Costa Rica (72).

** Esta clasificación es aproximada.

- | | | | |
|-------|---------------------------------------|--------|--|
| BMHT | - Bosque muy húmedo tropical | BSTTB | - Bosque seco tropical trans. a basal |
| BMHP | - Bosque muy húmedo premontano | BMHPTB | - Bosque seco tropical trans. a húmedo |
| ETP | - Bosque tropical premontano | BHMB | - Bosque muy húmedo prem. trans. a basal |
| BTMH | - Bosque tropical muy húmedo | BSTMH | - Bosque húmedo montano bajo |
| BHT | - Bosque húmedo tropical | BPM | - Bosque sub-trop. muy húmedo |
| BHP | - Bosque húmedo premontano | | - Bosque pluvial montano |
| BST | - Bosque seco tropical | | |
| BSTTB | - Bosque seco tropical trans. a basal | | |

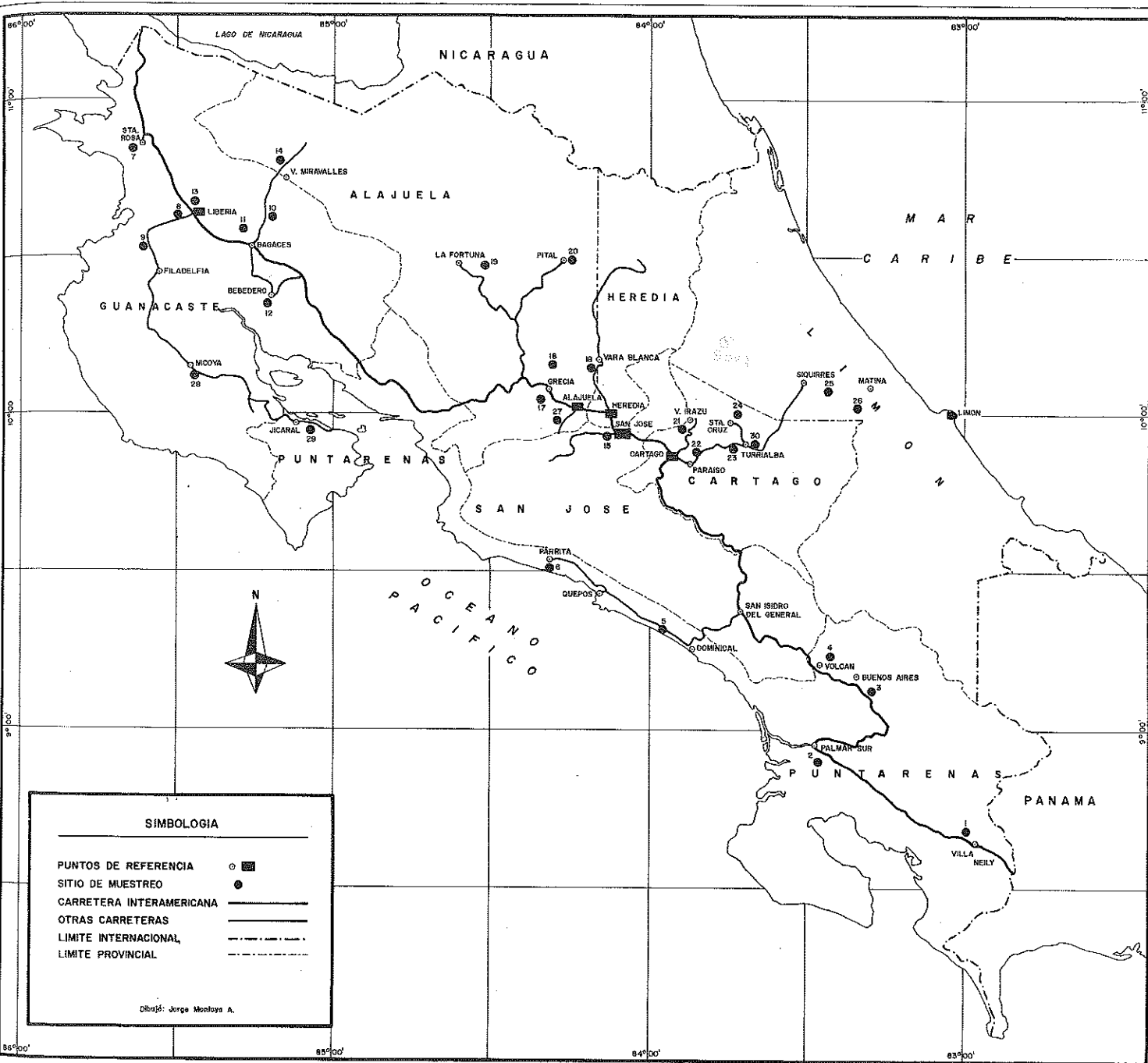


FIG. 1.- LOCALIZACION DE LOS SITIOS DE MUESTREO DE 30 SUELOS DE COSTA RICA USADOS EN EL ESTUDIO DE EVALUACION DEL AZUFRE DISPONIBLE

drenaje superficial bueno. La zona está sometida a períodos prolongados de sequías (3-4 meses al año), siendo los cultivos principales de la zona banano, arroz y pasto.

La Piñera-3: Es un suelo profundo muy meteorizado y bien drenado. La muestra fue tomada en la finca La Piñera próxima a la localidad de Buenos Aires, provincia de Puntarenas. La topografía es plana ondulada con una pendiente de más o menos 3 por ciento. La vegetación es de sabana, siendo la piña y el pasto los cultivos principales de la zona.

Volcán-4: La muestra de este suelo fue colectada en la localidad de Volcán al norte de Buenos Aires, provincia de Puntarenas. Es un suelo profundo con buen drenaje superficial. La zona está sometida a un período prolongado de sequía (3-4 meses al año). Los cultivos principales de la zona son pasto y arroz.

Buena Vista-5: Un suelo aluvial a unos 30 km al sur de Quepos en la finca propiedad del señor Eliécer Castro Solano. La muestra fue colectada a unos 500 m de distancia del Océano Pacífico. El terreno es plano con drenaje superficial regular y la napa freática de 60 a 80 cm de profundidad. Los cultivos principales son sorgo, arroz, maíz y pasto.

Finca Ligia-6: Este suelo está localizado al oeste de la población de Parrita en terreno plano, con drenaje superficial bueno. La zona presenta época de sequía intensa (3-4 meses al año), siendo los cultivos principales la palma de aceite, el arroz y el sorgo de grano. Este suelo ha sido cultivado en forma intensiva por más de 10 años con arroz y sorgo de grano.

Santa Rosa-7: Este suelo aluvial de topografía plana, con buen drenaje fue colectado en los pastizales del Parque Nacional de Santa Rosa, con pendiente de 5 a 10 por ciento y buen drenaje superficial.

La Flor-8: Se colectó esta muestra en terreno de relieve plano con pendiente de 0 a 3 por ciento. En la zona donde se colectó se presentan períodos prolongados de sequía (3-4 meses), con buen drenaje superficial. Los cultivos principales son el pasto y el arroz.

Los Angeles-9: El lugar en donde se colectó la muestra está localizado al sur de Liberia sobre el valle del Río Tempisque, en la segunda terraza, con una pendiente de 0 a 3 por ciento. La zona está sometida a temporadas de sequías prolongadas, siendo los cultivos principales arroz, maíz y algodón.

Bagaces-10: La muestra fue colectada a unos 5 kilómetros al norte de Bagaces, en un área de pastos y bosques naturales bajos, con topografía ondulada y pendiente de 5 a 10 por ciento.

La Ceiba-11: Esta muestra se colectó en un área de topografía plana con buen drenaje superficial, a 2 km al norte de la entrada a Bagaces por la carretera Panamericana, siendo el pasto el cultivo principal de la región. En la zona se presentan períodos prolongados de sequía (3-4 meses).

Taboga-12: Esta muestra fue colectada en el lote Escameka en la Estación Experimental Enrique Jiménez Nuñez del MAG, en las proximidades de Taboga, provincia de Guanacaste. Los cultivos principales de la

zona son arroz, pasto y caña de azúcar. El terreno es plano.

Liberia-13: El suelo fue colectado en las pampas a 2 km de Liberia, Guanacaste, hacia el norte siguiendo la carretera Panamericana. El terreno presenta una topografía plana con pendiente de 0 a 2 por ciento. Los cultivos principales de la zona son el arroz, pasto y algodón.

Colonia Blanca-14: Esta muestra se tomó al norte de Liberia en un área cubierta por pastos y bosques naturales altos, con topografía ondulada.

Guachipelín-15: El lugar en donde se colectó esta muestra se caracteriza por una topografía ondulada y pendiente de 4 a 8 por ciento; está localizada sobre la Meseta Central. En el momento del muestreo el terreno estaba cubierto de pasto natural.

Cooperativa Victoria-16: Esta muestra fue tomada en terreno perteneciente a la Cooperativa Victoria, Grecia. El terreno es dedicado al cultivo de la caña de azúcar y pasto. Este terreno es de topografía ondulada con pendiente de 10 a 15 por ciento y el drenaje superficial es bueno.

La Argentina-17: Se tomó esta muestra en un lugar desarrollado sobre cenizas y materiales volcánicos que provienen en su mayoría del Volcán Poás; está localizado entre Grecia y Alajuela sobre la Autopista General Cañas. El relieve es montañoso con pendiente de 40 a 50 por ciento y el terreno es pedregoso con drenaje superficial bueno y poco profundo. El cultivo principal de la zona es la caña de azúcar.

Vara Blanca-18: Es un suelo volcánico viejo colectado en Vara Blanca, provincia de Heredia a una altitud de 1900 m.s.n.m. La vegetación observada al momento del muestreo fue pasto. La pendiente del lugar es de 7 por ciento aproximadamente. El área se encuentra localizada en la región montañosa del Volcán Poás. Son suelos profundos con buen drenaje.

San Josecito-19: Esta muestra fue colectada en San Josecito, llanura de San Carlos, provincia de Alajuela. Este suelo se ha desarrollado sobre un aluvión cubierto por una fina capa de cenizas, con poca pendiente (0-5%). La vegetación natural es de pasto. Los cultivos de la zona son maíz, plátano, yuca y pastos.

Pital-20: Este suelo fue colectado en el poblado de Pital, Llanura de San Carlos, provincia de Alajuela. El drenaje superficial es bueno, la topografía plana y los cultivos principales son pasto, yuca, piña y plátano.

Sanatorio Durán-21: Se colectó esta muestra en las proximidades del Sanatorio Durán por la carretera que comunica a Cartago con el Volcán Irazú. Este suelo fue formado por cenizas recientes del Volcán Irazú; con pendiente de 10 a 15 por ciento, drenaje superficial bueno y profundo. El terreno estaba cubierto por pasto y los cultivos principales de la zona son hortalizas, papa y pasto.

Fundo La Fuente-22: Es un suelo profundo bien drenado, con topografía ondulada y pendiente de 6 a 10 por ciento, perteneciendo a la

serie Birrisito. Fue colectada a 200 m al costado norte de la carretera que conduce a San José, a 3 km al oeste de Cervantes. El terreno está cultivado con pastos. En la zona circunvecina se cultivan hortalizas y papa.

Juan Viñas-23: Este suelo perteneciente a la serie Birrisito es derivado de cenizas volcánicas. La muestra fue colectada a 5 km de Turrialba por la carretera que conduce a Juan Viñas. El lugar donde se tomó la muestra estaba cubierto de pastos. Estos suelos tienen buen drenaje superficial, topografía ondulada y pendiente de 10 a 15 por ciento. El cultivo de la zona es la caña de azúcar.

Volcán Turrialba-24: Este andosol formado por cenizas del Volcán Turrialba, fue colectado en terreno de la lechería Santa Elena, próximo a Santa Cruz, Turrialba. El terreno es ondulado con pendiente de 10 a 15 por ciento, y el cultivo principal es el pasto.

La Lola-25: La muestra fue colectada en la finca experimental propiedad del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). La topografía es casi plana, con pendiente de 0 a 3 por ciento y son suelos profundos. Los cultivos de la zona son cacao y banano.

Bataán-26: La muestra fue colectada a un costado de la estación experimental arrocera de Bataán, siguiendo la carretera que conduce a Limón. El terreno es casi plano con pendiente de 2 por ciento. El suelo está formado de aluviones recientes y anteriormente estaba cultivado con abacá. Los cultivos principales son banano y cacao. El

drenaje del suelo superficial es bueno, sujeto a inundarse periódicamente.

Aeropuerto-27: Esta muestra fue colectada a 3,5 km al norte del Aeropuerto Juan Santamaría, próximo a Villa Bonita, por la Autopista General Cañas. Es un suelo aluvio-volcánico, con napa freática de 70 a 80 cm. Este terreno estaba cubierto por pastos naturales.

Nicoya-28: La muestra viene de la finca La Fortuna, propiedad del señor Nayib Nema. La topografía es ondulada y la pendiente es ligera. El suelo es profundo con buen drenaje y el cultivo principal de la región es el pasto.

Jicarál-29: Esta muestra fue colectada entre las localidades de Jicarál y Lepanto, Nicoya, en la finca propiedad del señor Alvaro Zamora. El terreno es plano con drenaje superficial malo. El cultivo principal de la región es el pasto.

Colorado-30: Este suelo es un latosol en avanzado grado de meteorización. La muestra fue colectada en terreno propiedad del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, ocupado por plantaciones forestales. La topografía del lugar es ondulada con pendiente de 6 a 10 por ciento. Los cultivos principales de la región son la caña y pasto. El drenaje superficial es bueno, notándose en la superficie acumulaciones de rocas en estado de descomposición.

3.2 Preparación del material

Después de reunir todas las muestras se secaron al aire

libre, se tamizaron por una malla de cuatro milímetros de diámetro, homogenizaron y se colocaron en bolsas de polietileno, en donde permanecieron hasta el inicio de los diferentes análisis físicos y químicos y el establecimiento del ensayo de invernadero.

3.3 Caracterizaciones físicas y químicas de los suelos

Las características físicas y químicas de los suelos se determinaron según los métodos indicados en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Determinaciones físicas y químicas realizadas y los métodos empleados para caracterizar los 30 suelos.

Determinación	Métodos	Referencias
pH	Peech <u>et al.</u>	(60)
Materia orgánica	Walkley-Black, descrito por Jackson y modificado por Saíz del Río y Bornemisza	(41) (65)
Nitrógeno total	Bremmer	(13)
Fósforo extraíble	Olsen, modificado por Hunter	(40) (59)
Bases cambiables (K, Ca, Mg y Na)	Bower <u>et al.</u> modificado por Díaz Romeu y Balerdi	(12) (26)
Aluminio intercambiable	McLean	(55)
Textura	Bouyoucos	(11)
Densidad aparente	Forsythe	(31)

3.4 Extracción y determinación del azufre extraíble

Los diferentes métodos de extracción (fosfato de calcio solo y con ácido acético, fosfato de calcio-cloruro de calcio, fosfato de potasio, carbonato ácido de sodio, acetato de amonio, y cloruro de calcio), se describen en el Cuadro 3. El procedimiento de extracción consistió en agitar 20 g de suelo, tamizado por una malla de cuatro milímetros con 50 ml de la solución extractora durante 30 minutos, adicionando 0,1 g de carbón activado. Las muestras, después de agitadas, se centrifugaron por cinco minutos, y posteriormente se filtraron a través de papel Watman N° 42. Todas las extracciones fueron hechas por duplicado.

Cuadro 3. Extractantes usados para la determinación del azufre disponible en los 30 suelos de Costa Rica.

Solutos	Solventes	Abreviaturas	Referencias
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ H_2O 0,008M	Acido acético <u>2N</u>	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ -HOAc	(37)
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ H_2O 0,008M	Agua	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	(30) (63)
CaCl_2 0,012M	Agua	CaCl_2	(62) (74) (77)
KH_2PO_4 0,016M	Agua	KH_2PO_4	(27)
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ H_2O 0,008M + CaCl_2 , 0,01M	Agua	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ - CaCl_2	---
$\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ 0,48M	Acido acético 0,25 <u>N</u>	$\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ -HOAc	(6)
NaHCO_3 , 0,5M, pH 8,5	Acido acético <u>2N</u>	NaHCO_3 -HOAc	(39) (59)

El contenido de azufre en forma de sulfatos de los extractos fue determinado usando el método modificado de Massoumi y Cornfield (49). Se sacó una alícuota de 10 ml del extracto adicionando 10 ml de una solución de ácido nítrico al 6,25 por ciento (v/v) conteniendo dos ppm de azufre como K_2SO_4 , 5 ml de una solución de ácido acético 8,7 N que contenga 0,5 por ciento de goma acacia y 0,5 g de cloruro de bario. En el volumen final de 25 ml previamente agitado, se determinó la concentración del azufre por turbidimetría en un espectrofotómetro a 440 m μ , con base en una curva estándar preparada con 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 y 20 ppm de S, usando como reactivo K_2SO_4 .

3.5 Experimento de invernadero

La presente investigación se llevó a cabo en un invernadero del Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, en Turrialba, Costa Rica. Durante el período experimental en el invernadero, la temperatura media fue de 24,4°C con una máxima de 31,2°C, y una mínima de 17,7°C. La humedad relativa media fue 69,3 por ciento con una máxima de 90,9 por ciento y una mínima de 47,0 por ciento. Las condiciones externas durante el tiempo del ensayo fueron: temperatura media 19,6°C, máxima 24,5°C y mínima 16,3°C; la humedad relativa media 81,8 por ciento y mínima de 53,6 por ciento*.

* Estación meteorológica del CATIE.

El ensayo se realizó bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. A cada suelo se le aplicaron dos tratamientos, 0 y 60 kg (180 kg de SO_4^{2-}) de azufre por hectárea.

Se utilizaron macetas metálicas de aproximadamente tres litros de capacidad. En el fondo de cada maceta se colocó una fina capa de grava, previamente lavada y pasada por un tamíz con malla de 7 mm; sobre esta grava se depositaron 2 kg de suelo secado al aire.

Todos los nutrimentos, excepto el nitrógeno, fueron aplicados en solución al suelo antes de la siembra. Se dejaron pasar unos ocho días después de la aplicación para permitir un período de equilibrio entre el fertilizante y el suelo. De la misma manera se adicionó agua, procurando que el suelo tuviera humedad suficiente al efectuarse la siembra.

En el Cuadro 4 aparecen las fuentes y cantidades de los nutrimentos aplicados por cada 2 kg de suelo.

Las dosis de micronutrientes se tomaron basándose en el trabajo de invernadero hecho por Muller (57), con suelos de Centro América.

Las dosis de fósforo se determinaron por grupos de suelos en base a las curvas de fijación preparadas siguiendo la técnica descrita por Waugh y Fitts (75). Se tomaron 10 muestras de 5 g de suelo cada una, a las que se agregaron 2 ml de soluciones de 0, 125, 250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 y 2000 ppm de P y se incubaron por cuatro días. Finalmente se hizo la extracción de P por el método de Olsen modificado (40, 59). El nivel crítico de fósforo se determinó en base a los trabajos descritos por Hunter (40) y Miner y Cordero (56).

Cuadro 4. Centicidades de nutrimentos (g/maceta x kg/ha) aplicados en el Invernadero a los 30 suetos de Costa Rica, usados en el experimento de azufre disponible.

Suelo N°	Nombre	NITROGENO NH ₄ NO ₃ g/maceta	NITROGENO N Kg/ha	FOSFORO NH ₄ PO ₄ P Kg/ha	POTASIO KCl K Kg/ha	MAGNESIO MgCO ₃ Mg g/maceta	Mg Kg/ha	AZUFRE NaSO ₄ S Kg/ha	S Kg/ha	CALCIO Ca(OH) ₂ Ca g/maceta	Ca Kg/ha	COBRE CuCu ₂ Cu g/maceta	Cu Kg/ha	ZINC ZnZnCl ₂ Zn g/maceta	Zn Kg/ha	MANGANESO MnMnCl ₂ Mn g/maceta	Mn Kg/ha	HIERRO Fe ₆ SO ₇ Fe g/maceta	Fe Kg/ha	MOLIBDENO Na ₂ MoO ₄ Mo g/maceta	Mo Kg/ha	BORO Ma ₂ B ₁₀ O ₇ B g/maceta	B Kg/ha
1	Caracol	1,14	400	1,70	390	3,60	1030	0,27	60	0,37	200	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
2	Palmar Sur	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
3	La Piñera	1,14	400	3,40	780	0,19	100	0,27	60	0,65	351	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
4	Volcán	1,14	400	3,40	780	0,38	200	0,27	60	0,38	200	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
5	Buena Vista	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
6	Finca Ligia	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
7	Santa Rosa	1,14	400	0,45	100	---	---	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
8	La Flor	1,14	400	0,45	100	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
9	Los Angeles	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
10	Bagaces	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
11	La Ceiba	1,14	400	0,90	200	0,38	200	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
12	Taboga	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
13	Liberia	1,14	400	1,70	390	0,19	100	0,27	60	0,98	280	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
14	Colonia Blanca	1,14	400	3,40	780	0,19	100	0,27	60	0,12	65	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
15	Guachipalín	1,14	400	1,70	390	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
16	Coop. Victoria	1,14	400	3,40	780	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
17	La Argentina	1,14	400	3,40	780	0,38	200	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
18	Vara Blanca	1,14	400	1,70	390	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
19	San Josecito	1,14	400	3,40	780	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
20	Pital	1,14	400	3,40	780	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
21	San, Durán	1,14	400	1,70	390	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
22	F. La Fuente	1,14	400	1,13	2500	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
23	Juan Vinas	1,14	400	1,13	2500	0,38	200	0,27	60	0,22	119	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
24	V. Turrialba	1,14	400	1,13	2500	0,38	200	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
25	La Laja	1,14	400	1,70	390	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
26	Bataán	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
27	Aeropuerto	1,14	400	3,40	780	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
28	Nicoya	1,14	400	3,40	780	0,38	200	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
29	Jicaral	1,14	400	0,90	200	0,19	100	0,27	60	---	---	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50
30	Colorado	1,14	400	3,40	780	0,38	200	0,27	60	0,22	119	0,027	10	0,041	20	0,14	40	0,26	50	0,02	10	0,04	50

Las necesidades de potasio se determinaron basándose en el análisis de suelos, aplicando 200 kg/ha en los suelos cuyo contenido de potasio era inferior a 0,30 meq/100 g de suelo y 100 kg/ha en los que tuvieron cantidades superiores a 0,30 meq/100 g de suelo.

Las dosis de magnesio se calcularon con base en el magnesio cambiante y la relación Mg/K, adicionando Mg a los suelos con cantidades inferiores a 1,0 meq/100 g o tuvieron una relación Mg/K menor que 2.

Para controlar la acidez, se determinó el aluminio intercambiable, aplicando por cada meq de Al dos de Ca usando como fuente $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

El nitrógeno se aplicó en dos épocas, 200 kg/ha 8 días después de la siembra y 200 kg más, 30 días después de la siembra.

La siembra se efectuó el 3 de diciembre de 1973, sembrándose 40 semillas de sorgo de la variedad 'DeKalb E57' en forma de círculo en cada maceta. A los cinco días de la siembra, comenzó la germinación y a los 10 días subsiguientes se efectuó un raleo, dejando 12 plantas por maceta.

La aplicación de agua se realizó de acuerdo a las necesidades del cultivo.

A los 53 días de la siembra se realizó la cosecha, cortando las plantas a nivel del suelo.

Las plantas de cada maceta fueron secadas en una estufa de aire forzado por 48 horas a 70°C, y pesadas para obtener el rendimiento de materia seca.

Para determinar la concentración de azufre en el sorgo, las plantas correspondientes a cada tratamiento fueron molidas y digeridas

en una solución ácida, nítrico-perclórico, en una relación 5:1, determinando el S de la solución final por turbidimetría (3).

3.6 Análisis estadístico de los resultados

El análisis estadístico de los rendimientos de materia seca y la concentración de azufre, corresponde al análisis estándar de un diseño de bloques completos al azar, cuyo modelo matemático es el siguiente:

$$Y_i = \mu + T_i + B_j + \epsilon_{ij}$$

donde:

Y_i = rendimiento de materia seca, o concentración de S en la planta, o azufre asimilado

μ = media

T_i = efecto de tratamientos

B_j = efecto de bloques

ϵ_{ij} = error experimental

Para detectar el grado de asociación entre el azufre extraído por cada método y los rendimientos relativos de los suelos, se efectuó un análisis de correlación lineal. Finalmente, para estas mismas variables se realizó un análisis de regresión, ajustando los datos a los modelos lineal, logarítmico, semilogarítmico, cuadrático y Mitscherlich.

Los resultados experimentales fueron procesados en la computadora IBM, modelo 1130 del IICA.

3.7 Determinación del nivel crítico

El nivel crítico de azufre para cada método fue determinado

siguiendo la metodología descrita por Cate y Nelson (15), que consiste en relacionar los datos de análisis de suelo con los rendimientos relativos. El rendimiento relativo se define como el rendimiento de un tratamiento, el cual proporciona las cantidades adecuadas, pero no excesivas, de todos los nutrientes menos del que está siendo estudiado, dividido por el rendimiento de un tratamiento igual al anterior, a excepción de que éste incluya el nutriente bajo estudio, y el resultado obtenido de esta operación se multiplica por 100 ($\frac{-S}{+S} \times 100$).

Para este método se preparó un gráfico con el porcentaje de rendimiento (eje-Y) vs los valores del análisis de suelo (eje-X).

Sobre una hoja de plástico transparente de tamaño aproximadamente una vez y media las dimensiones del gráfico, se traza un par de líneas perpendiculares, en tal forma que el plástico sea dividido en cuatro sectores.

El plástico se mueve sobre el gráfico en forma horizontal y vertical, manteniendo siempre las dos líneas paralelas a los dos ejes del gráfico, hasta que el número de puntos percibidos a través del plástico en los dos cuadrantes positivos (superior derecho e inferior izquierdo) sea el máximo, o a la inversa, cuando el número de puntos en los cuadrantes negativos (superior izquierdo e inferior derecho) sea el mínimo.

El punto donde la línea vertical del plástico intersecta al eje-X, dividiendo los datos en dos clases, se denomina "nivel crítico". Este valor indica que los suelos cuyos contenidos del elemento considerado estén por debajo de esa concentración tienen alta probabilidad de respuesta a este elemento, mientras que en aquellos suelos con contenido superiores al valor establecido por el nivel crítico la probabilidad de respuesta es mínima.

4. RESULTADOS

4.1 Propiedades químicas y físicas de los 30 suelos

Las propiedades químicas de los suelos utilizados en el presente experimento (Cuadro 5), en general son muy variadas.

El pH de los suelos oscila entre 3,6 y 5,9 en cloruro de potasio y 4,7 a 6,9 en agua. Existe un predominio de suelos ligeramente ácidos. El valor de pH más bajo los presenta el suelo Caracol-1, proveniente de una zona con bastante precipitación pluvial, mientras que el valor más alto corresponde al suelo de Los Angeles-9, que proviene de una zona con menor precipitación que el anterior.

Los porcentajes de materia orgánica de estos suelos fluctúan entre 0,97 para el suelo Caracol-1, hasta 16,07 para el suelo Juan Viñas. El contenido de nitrógeno para estos suelos se presenta entre 0,18 a 1,22 por ciento.

Con excepción de los suelos Santa Rosa-7, Taboga-12 y Sanatorio Durán-21, los suelos muestran cantidades muy bajas del contenido de fósforo extraíble.

Con respecto a los contenidos de potasio, calcio y magnesio intercambiables, se ve que sus valores son muy variables. El potasio se encuentra en un ámbito de 0,2 a 4,7 meq/100 g de suelo, mientras que para calcio y magnesio están entre 0,3 a 43,9 y 0,1 a 4,6 meq/100 g de suelo, respectivamente.

Las relaciones Mg/K se encuentran en un ámbito de 0,53 a 27,0, mientras que las relaciones Ca/Mg y Ca+Mg/K presentan valores que fluctúan entre 0,57 a 11,81 y 1,5 a 131,7. El aluminio intercambiable

Cuadro 5. Características químicas de 30 suelos de Costa Rica (0-30 cm).

Suelo Nº	Nombre	pH	KCl	H ₂ O	M.O.	N	P	K	Ca	Mg	Na	Al	Mg/K	Ca/Mg	Ca+Mg/K
1	Caracol	3,6	4,7	0,5	4,7	31,3	4,6	0,5	0,8	0,9	6,7	7,6			
2	Palmar Sur	4,8	5,5	3,0	0,9	19,9	2,2	0,2	0,0	2,4	8,7	23,7			
3	La Piñera	4,1	4,9	0,4	0,3	0,3	0,1	0,1	1,7	0,5	1,8	1,5			
4	Volcán	4,2	5,3	0,3	0,2	1,0	0,4	0,1	1,0	1,6	2,5	5,7			
5	Buena Vista	4,1	5,4	1,2	0,8	43,9	4,0	0,8	0,0	4,8	6,2	34,9			
6	Finca Ligia	4,6	5,7	5,2	0,5	20,4	4,3	0,2	0,0	8,3	4,6	47,3			
7	Santa Rosa	4,9	5,7	23,5	1,2	8,4	2,0	0,2	0,0	1,6	4,1	8,3			
8	La Flor	4,8	5,8	2,5	0,3	7,0	0,9	0,3	0,0	2,8	7,3	23,7			
9	Los Angeles	5,9	6,9	5,6	1,4	18,4	1,6	0,3	0,0	1,1	11,1	13,8			
10	Bagaces	5,2	6,2	2,5	0,6	11,1	1,6	0,2	0,0	2,4	6,7	18,8			
11	La Ceiba	5,0	5,6	4,2	0,2	25,9	4,5	0,5	0,0	27,0	3,8	131,7			
12	Taboga	5,0	5,6	15,0	0,9	25,5	4,6	5,8	0,0	4,9	5,5	32,4			
13	Liberia	5,0	5,8	4,0	1,0	6,5	0,8	0,2	0,0	0,8	7,7	7,1			
14	Col. Blanca	4,6	5,3	0,6	0,6	3,0	0,7	0,2	0,3	1,2	4,1	6,2			
15	Guachipelín	4,7	5,6	4,0	0,3	10,3	3,7	0,3	0,0	10,4	2,7	39,0			
16	Coop. Victoria	5,4	6,2	1,0	0,9	13,3	2,6	0,5	0,0	2,6	5,0	16,1			
17	La Argentina	4,9	5,6	1,0	1,3	8,0	2,0	0,2	0,0	1,5	3,8	7,4			
18	Vara Blanca	4,5	5,1	1,2	0,3	1,1	0,4	0,3	0,0	1,2	2,6	4,5			
19	San Josecito	5,1	6,0	0,3	1,8	11,7	1,5	0,3	0,0	0,8	8,1	7,6			
20	Pital	4,3	4,8	0,7	1,0	5,6	1,0	0,3	0,0	0,9	5,5	6,3			
21	San. Durán	4,8	5,8	14,9	1,9	5,4	1,7	0,9	0,0	0,8	3,1	3,6			
22	F. La Fuente	4,8	5,4	5,82	0,35	7,1	2,4	0,2	0,0	2,3	2,9	9,1			
23	Juan Viñas	4,3	5,0	15,68	1,22	1,7	0,8	0,3	0,5	2,5	2,1	8,0			
24	V. Turrialba	4,7	5,1	16,07	1,16	1,4	0,6	0,3	0,0	4,0	2,3	13,2			
25	La Lola	5,0	5,7	13,62	0,84	27,6	4,4	0,3	0,0	4,3	6,2	30,9			
26	Bataán	5,0	6,0	1,85	0,23	33,6	2,8	0,4	0,0	2,5	11,8	32,5			
27	Aeropuerto	4,8	5,2	3,71	0,23	9,0	3,1	0,2	0,0	5,0	2,8	19,6			
28	Nicoya	4,4	5,3	5,46	0,33	20,1	4,0	0,4	0,0	14,1	5,0	85,3			
29	Jicaral	4,5	5,2	7,06	0,34	30,5	1,1	0,3	0,0	5,7	4,8	33,5			
30	Colorado	4,0	4,8	4,0	1,0	0,5	0,9	0,2	0,5	13,8	0,5	21,6			
				1,3	1,0										

fue detectado en sólo seis suelos de los 30 utilizados.

4.2 Propiedades físicas de los suelos

Las propiedades físicas de los suelos utilizados en este estudio se presentan en el Cuadro 6. Respecto a la textura se observa que varían entre franco a arcillosos con un predominio de suelos franco arcillosos.

La densidad aparente varía entre 0,38 a 1,27 g/ml en muestras no alteradas (condiciones de campo), correspondiendo los valores más bajos a los suelos de origen volcánico recientes. Como puede apreciarse algunos de los suelos presentan valores de densidad aparente altos (superior a 1 g/ml) lo cual indica que estos suelos pueden presentar problemas de compactación que ocasionan dificultades para el normal desarrollo de las raíces de algunos cultivos.

Los porcentajes de humedad volumétrica a 0,33 bar de tensión se encuentran en un ámbito de 32,0 a 61,0 por ciento para la superficie comprendida entre los 0 y 20 cm de profundidad, mientras que para la profundidad de 20 a 40 cm es de 31 a 50 por ciento, presentándose los valores más altos en los suelos de origen volcánico recientes.

4.3 Azufre extraído por los diferentes métodos

Los valores de azufre extraído por los métodos fosfato de calcio-ácido acético, fosfato de calcio, fosfato de potasio y fosfato de calcio-cloruro de calcio se muestran en el Cuadro 7. En dicho cuadro se nota que el azufre extraído por el fosfato de calcio-ácido acético varía entre 2,6 a 13 ppm, siendo el método que menor cantidad de azufre extrae.

Cuadro 6. Textura, densidad aparente y humedad gravimétrica a 1/3 de bar de succión de 30 suelos de Costa Rica.

Suelo	Textura	Dens. Ap. Campo g/ml	HV (%) a 1/3 bar	
			0-20 cm	20-40 cm
1	Franco arenoso	1,10	32,0	31,0
2	Franco limoso	1,25	37,0	41,0
3	Franco arcilla arenoso	1,03	32,0	31,0
4	Franco arcilla arenoso	1,07	--	--
5	Franco arcilloso	1,27	47,0	38,0
6	Franco limoso	1,20	34,0	32,0
7*	Franco arcilloso	--	--	--
8*	Franco	--	--	--
9*	Franco limoso	--	--	--
10*	Franco arcilloso	--	--	--
11*	Arcilloso	--	--	--
12*	Franco arcilloso	--	--	--
13*	Franco arcilloso	--	--	--
14*	Franco arcilla arenoso	--	--	--
15	Franco arcilloso	0,91	--	--
16	Franco	0,74	--	--
17	Franco arcilla arenoso	0,98	--	--
18	Franco arenoso	0,38	--	--
19	Franco arcilla arenoso	0,95	41,0	49,0
20	Arcilla arenoso	0,89	46,0	46,0
21	Franco arenoso	1,00	40,0	43,0
22	Franco	0,62	52,0	49,0
23	Franco arenoso	0,51	57,0	52,0
24	Franco arenoso	0,53	61,0	55,0
25	Franco arenoso	1,13	45,0	40,0
26	Franco limoso	0,95	52,0	49,0
27	Arcilloso	1,06	47,0	45,0
28	Franco arcilloso	1,09	55,0	42,0
29	Franco arcilla limoso	1,13	45,0	43,0
30	Franco arcilloso	1,00	51,0	50,0

* Muestras colectadas por funcionarios del Departamento de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Cuadro 7. Valores promedios de azufre extraído (ppm) por los varios métodos y sus medidas de variabilidad.

Suelo	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	KHPO_4	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaI}_2$
1	11,2	12,6	6,3	3,8
2	6,6	7,8	3,9	1,3
3	12,5	34,4	35,4	24,8
4	10,0	22,1	29,4	20,4
5	10,7	12,2	6,1	6,1
6	4,2	7,8	3,2	1,3
7	10,1	14,1	5,1	3,8
8	7,0	7,6	3,8	1,9
9	3,5	8,1	4,5	1,4
10	4,6	1,9	5,9	1,6
11	4,9	9,8	9,8	3,8
12	4,9	11,3	5,3	1,4
13	2,6	9,1	6,5	5,8
14	7,6	42,6	31,1	29,7
15	13,1	13,5	9,4	12,1
16	8,9	37,3	29,1	22,0
17	5,9	13,9	8,6	1,3
18	9,7	37,5	38,6	10,1
19	5,8	16,1	6,6	1,4
20	6,2	16,9	16,9	5,9
21	6,8	19,2	9,6	1,7
22	6,1	16,9	26,6	12,3
23	7,1	2,5	25,0	8,7
24	6,1	3,4	23,8	8,8
25	5,3	5,7	3,5	2,1
26	6,6	20,5	1,7	2,1
27	3,2	15,6	3,5	2,1
28	3,0	6,8	0,6	0,6
29	3,1	4,2	1,7	0,7
30	4,9	4,2	5,2	2,1
CV	19,7	23,8	15,4	36,1
Desv. estándar	1,3	3,4	1,8	2,4

El coeficiente de variación para éste es de 19,7 por ciento y una desviación estándar de 1,3.

En el método de fosfato de calcio se encuentran valores de azufre que fluctúan entre 2,0 a 42,6 ppm, constituyendo el método que mayor cantidad de azufre extrae de los suelos. Además presenta la mayor desviación estándar (3,4), con un coeficiente de variación de 23,8 por ciento.

Los valores de azufre en el método fosfato de potasio fluctúan entre 0,6 a 38,6 ppm con el menor coeficiente de variación (15,4%), con una desviación estándar de 1,8.

Para el fosfato de calcio-cloruro de calcio los valores de azufre varían entre 0,6 y 29,7 ppm, presentando el mayor coeficiente de variación (36,1%) y una desviación estándar de 2,4.

4.4 Estudio de invernadero

En los suelos en que el azufre fue un factor limitante de la producción de materia seca del cultivo de sorgo, se notó la aparición de un color amarillento en las hojas más jóvenes. Al ir avanzando el cultivo en edad el amarillamiento apareció además en las hojas viejas, presentándose mayor palidez entre los 30-40 días de edad de las plantas. Esto se puede notar en una vista general sobre el aspecto y disposición del ensayo, en el invernadero (Figura 2), así como el contraste ofrecido por el desarrollo y color de las plantas de sorgo cultivada en el suelo Bagaces-10, tratamiento con y sin azufre (Figura 3), tomado a los 35 días de edad de las plantas.

Los rendimientos de materia seca de los testigos (Cuadro 8),



Fig. 2. Aspecto general del ensayo a los 35 días de edad de las plantas.



Fig. 3. Apariencia de las plantas de los tratamientos con (+S) y sin (-S) azufre, cultivadas en el suelo Bagaces a los 35 días de edad.

Cuadro 8. Rendimientos promedios de materia seca, rendimientos relativos, concentración de azufre y azufre asimilado por el cultivo.

Suelo	Materia seca (g/maceta)		Rendimiento relativo* (%)	Concentración de azufre (ppm)		Azufre asimilado (mg/maceta)	
	con S	sin S		con S	sin S	con S	sin S
1	25,1	23,2	95,9	762	358	18,5	8,3
2	28,6	17,4	60,6	704	250	20,1	4,2
3	7,9	8,8	109,1	658	350	5,2	3,0
4	11,1	10,8	98,0	791	466	8,9	5,2
5	23,4	19,5	86,0	737	362	17,1	7,1
6	22,1	13,0	59,9	658	229	14,3	3,0
7	26,4	25,9	88,8	850	437	22,4	11,3
8	19,3	16,5	97,9	654	254	12,1	4,2
9	17,9	10,8	62,1	770	316	14,2	3,3
10	30,9	15,6	50,5	658	245	20,3	3,8
11	26,9	21,9	81,4	641	312	17,1	6,9
12	26,1	14,4	55,0	654	300	17,2	5,3
13	23,0	20,2	89,1	666	375	15,3	7,6
14	19,8	22,8	115,3	804	800	15,9	18,4
15	31,3	28,1	91,4	675	687	21,2	19,4
16	20,2	18,2	90,0	608	658	12,3	12,0
17	31,4	29,0	93,0	679	595	21,5	17,2
18	4,1	4,7	115,3	787	512	3,3	2,4
19	21,5	24,6	119,2	591	545	12,8	13,2
20	29,0	33,7	115,4	704	591	20,4	19,9
21	8,6	7,0	93,1	750	675	6,6	5,2
22	6,7	7,2	106,0	825	833	5,6	6,1
23	5,1	4,0	77,2	858	904	4,4	3,4
24	19,8	19,7	103,1	1366	1241	26,6	24,9
25	22,1	8,8	42,0	733	204	15,8	1,7
26	21,4	14,0	68,1	675	291	14,3	4,1
27	22,0	24,9	114,7	670	425	14,6	10,6
28	15,9	5,9	38,4	679	279	10,8	1,6
29	26,8	10,0	37,5	629	229	16,8	2,3
30	21,5	17,5	80,8	683	350	14,8	6,1

* Rendimiento relativo = (rendimiento testigo/rendimiento tratamiento con azufre) x 100.

varían entre 4,0 y 33,0 g por maceta, mientras que en los tratamientos con azufre los rendimientos de materia seca fluctúan entre 4,2 y 31,4 g por maceta. En estos valores se aprecia que los rendimientos de materia seca de los tratamientos testigo en los suelos Colonia Blanca-14, San Josecito-19, Pital-20 y Aeropuerto-27, son superiores a los del tratamiento con azufre. También se nota que los valores de rendimientos de materia seca son muy bajos en los suelos La Piñera-3, Volcán-4, Vara Blanca-18, Sanatorio Durán-21, Fundo La Fuente-22 y Juan Viñas-23, tanto en el tratamiento testigo como en el tratado con azufre.

Según el análisis de variancia efectuado para los rendimientos de materia seca (Cuadro 9), concentraciones de azufre (Cuadro 10) y azufre asimilado por las plantas (Cuadro 11), se distingue una respuesta estadísticamente significativa de los suelos a la aplicación de azufre.

Cuadro 9. Análisis de variancia de los rendimientos de materia seca de los tratamientos con y sin azufre en los 30 suelos.

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F calc.	F tabla 0,01
Repeticiones	2	26,90	13,45	1,65	4,79
Suelos	29	9298,63	320,64	39,58	1,86
Dosis de azufre	1	687,02	687,02	84,81	6,85
Suelos x dosis	29	1405,79	48,47	5,98	1,18
Error	118	956,72	8,11		
Total	179				

CV = 15,3%

LSD (0,05) = 4,60

LSD (0,10) = 3,85

Cuadro 10. Análisis de variancia de las concentraciones de azufre en plantas de los tratamientos con y sin azufre en los 30 suelos.

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F calc.	F tabla 0,01
Repeticiones	2	433505,18	216752,59	24,87	4,79
Suelos	29	5510795,01	190027,40	27,73	1,86
Dosis de azufre	1	3077855,00	3077855,00	353,17	6,85
Suelos x dosis	29	1365865,25	47098,79	5,40	1,18
Error	118	1028360,00	8114,91		
Total	179				

CV = 15,5% LSD (0,05) = 150,9 LSD (0,10) = 126,5

Cuadro 11. Análisis de variancia del azufre asimilado por las plantas de los tratamientos con y sin azufre.

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F calc.	F tabla 0,01
Repeticiones	2	2,18	1,09	15,57	4,79
Suelos	29	49,78	1,71	24,42	1,86
Azufre (dosis)	1	19,76	19,76	282,28	6,85
Suelos x azufre	29	13,43	0,46	6,57	1,18
Error	118	8,29	0,07		
Total	179				

CV = 23% LSD (0,05) = 0,21

Basado en el criterio de comparación de medias, conocido como diferencia mínima significativa (LSD 0,05), aplicado a las medias de los rendimientos de materia seca, los tratamientos con y sin azufre de los 30 suelos empleados en el estudio, puede afirmarse que los suelos Palmar Sur-2, Finca Ligia-6, Los Angeles-9, Bagaces-10, La Ceiba-11, Taboga-12, La Lola-25, Bataán-26, Nicoya-28 y Jicaral-29 respondieron significativamente, considerando el LSD a un nivel de significancia de 0,05, mientras que los de Buena Vista-5 y Colorado-30 respondieron tomando en cuenta el LSD a 0,10.

Por lo que respecta a rendimientos relativos (Cuadro 8), se nota que los suelos con respuesta positiva tienen valores que fluctúan entre 37,5 y 86,0 por ciento, correspondiendo el valor más bajo, o la respuesta más grande, al suelo Jicaral-29, y el más alto, o respuesta menor a Buena Vista-5.

En las concentraciones de azufre en las plantas (Cuadro 8), se ve que los valores fluctúan entre 204 y 1241 ppm en los tratamientos testigos, correspondiendo el valor más bajo al suelo La Lola-25 y el más alto al Volcán Turrialba-24. Los valores para los tratamientos con azufre varían entre 591 y 1366 ppm, perteneciendo el valor más bajo al suelo San Josecito-19 y el valor más alto al Volcán Turrialba-24.

Considerando los valores de LSD a 0,05 y 0,10 niveles de significancia para las concentraciones de azufre en plantas crecidas en los suelos, se nota que en 20 de los 30 suelos el azufre aplicado incrementó significativamente las concentraciones de azufre en las plantas. No se nota un incremento significativo en las concentraciones de

azufre en las plantas crecidas en los suelos Colonia Blanca-14, Guachipelín-15, Cooperativa Victoria-16, La Argentina-17, San Josecito-19 y Volcán Turrialba-24.

Al observar los valores de las concentraciones de azufre en plantas de los suelos con respuesta positiva al azufre aplicado (Cuadro 8), se nota que la concentración de azufre en las plantas de los tratamientos testigo fluctúan entre 204 y 362 ppm con un promedio de 280 ppm, mientras que para los tratamientos con azufre los valores se encuentran entre 629 y 770 ppm con un promedio de 685 ppm.

Los suelos sin respuesta al azufre tienen concentraciones de azufre que fluctúan entre 254 y 1241 ppm con un promedio de 576 para el tratamiento testigo y de 608 a 1366 con un promedio de 782 ppm para el tratamiento con azufre. Los suelos con respuesta negativa al azufre aplicado dan valores de azufre en plantas de los tratamientos testigos que fluctúan entre 425 y 800 con un promedio de 590, mientras que en los tratamientos con azufre las concentraciones están entre 591 a 804 ppm con un promedio de 692. En estos resultados no se incluyen los valores correspondientes a los suelos La Piñera-3, Volcán-4, Vara Blanca-18, Sanatorio Durán-21, Fundo La Fuente-22 y Juan Viñas-23, debido a los bajos rendimientos de materia seca obtenidos en estos suelos. Esto indica que hubo un factor limitando el crecimiento, por lo cual el efecto de azufre no pudo ser estimado en dichos suelos.

Con respecto al azufre asimilado por el sorgo en los suelos (Cuadro 8), la tendencia era similar a las de las concentraciones de azufre, con un rango que fluctúa entre 1,6 a 24,9 mg/maceta en los

tratamientos sin azufre y de 3,3 a 26,6 mg/maceta en los tratamientos con azufre.

4.5 Evaluación de extractantes

Para determinar la capacidad de predicción de deficiencias de azufre con los métodos usados, se relacionaron el azufre extraído (ppm) por cada método con el rendimiento relativo de materia seca y azufre asimilado (Cuadro 12).

Cuadro 12. Coeficientes de correlación lineal entre los extractantes probados y los rendimientos relativos de materia seca y al azufre asimilado por el sorgo.

Métodos	Rendimientos relativos de materia seca	Azufre asimilado relativo (mg)
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$	0,45*	0,33
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	0,57**	0,55**
KHPO_4	0,57**	0,62**
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}$	0,49**	0,55**

* Nivel de significancia al 0,05

** Nivel de significancia al 0,01

Los coeficientes de determinación (R^2) y los diversos modelos a que fueron ajustados los datos, se presentan en el Cuadro 13. Asimismo las ecuaciones propias para cada modelo, con los diferentes métodos

de extracción, se presentan en el Cuadro 1 del Apéndice.

Cuadro 13. Coeficientes de determinación de diferentes modelos, relacionando el azufre extraído de los cuatro métodos con los rendimientos relativos de materia seca.

Nombre	Modelo	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ⁻	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	KH ₂ PO ₄	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ⁻
		HOAc			CaCl ₂
Coeficientes de determinación (R ²)					
Lineal	$\hat{Y} = bo + b_1 X$	0,20	0,33	0,33	0,24
Semi-logarítmico	$\hat{Y} = bo + b_1 \log x$	0,22	0,36	0,40	0,46
Logarítmico	$\log \hat{Y} = \log bo + b_1 \log x$	0,25	0,34	0,48	0,42
Cuadrático	$\hat{Y} = bo + b_1 X_1 + b_2 X_1^2$	0,24	0,30	0,39	0,31
Mitscherlich	$\hat{Y} = A(1 - e^{-bx})$	0,23	0,24	0,44	0,47

En este cuadro se ve que ninguno de los modelos empleados dio un buen ajuste, pues el R² calculado es bajo en la mayoría de los casos; sin embargo, en general, los mejores R² fueron obtenidos con los métodos fosfato de potasio y fosfato de calcio-cloruro de calcio.

Para estimar el nivel crítico de cada uno de los métodos se relacionaron el azufre extraído (ppm) por cada uno de los métodos probados con los rendimientos relativos de materia seca, empleando la técnica descrita por Cate y Nelson (Figuras 4, 5, 6 y 7).

En la Figura 4 aparece la relación entre el azufre extraído por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$ y los rendimientos relativos de materia seca. En dicha figura se nota que el nivel crítico estimado es seis ppm. Un total de cuatro suelos están localizados en los dos cuadrantes negativos (superior izquierda e inferior derecha), mientras que los restantes 26 suelos se localizan en los cuadrantes positivos (10 en el inferior izquierdo y 16 en el superior derecho).

Usando $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (Figura 5), se puede notar que el nivel crítico estimado es ocho ppm, encontrándose en los cuadrantes negativos cinco suelos. En el cuadrante inferior izquierdo se localizan 8 suelos y en el superior derecho se encuentran 17 suelos.

Al relacionar los rendimientos relativos de materia seca y el azufre extraído por el método de KH_2PO_4 (Figura 6), se nota que el nivel crítico estimado es seis ppm. Aquí se ve que cuatro suelos están dentro de los cuadrantes negativos y nueve suelos están en el cuadrante inferior izquierdo y 18 suelos están en el cuadrante superior derecho.

En la Figura 7, donde se correlacionan los rendimientos relativos de la materia seca contra el azufre extraído por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$, se nota que el nivel crítico estimado es de tres ppm. Se encuentran 6 suelos en los cuadrantes negativos y en los cuadrantes positivos se localizan 9 suelos en el inferior izquierdo y 15 suelos en el superior derecho.

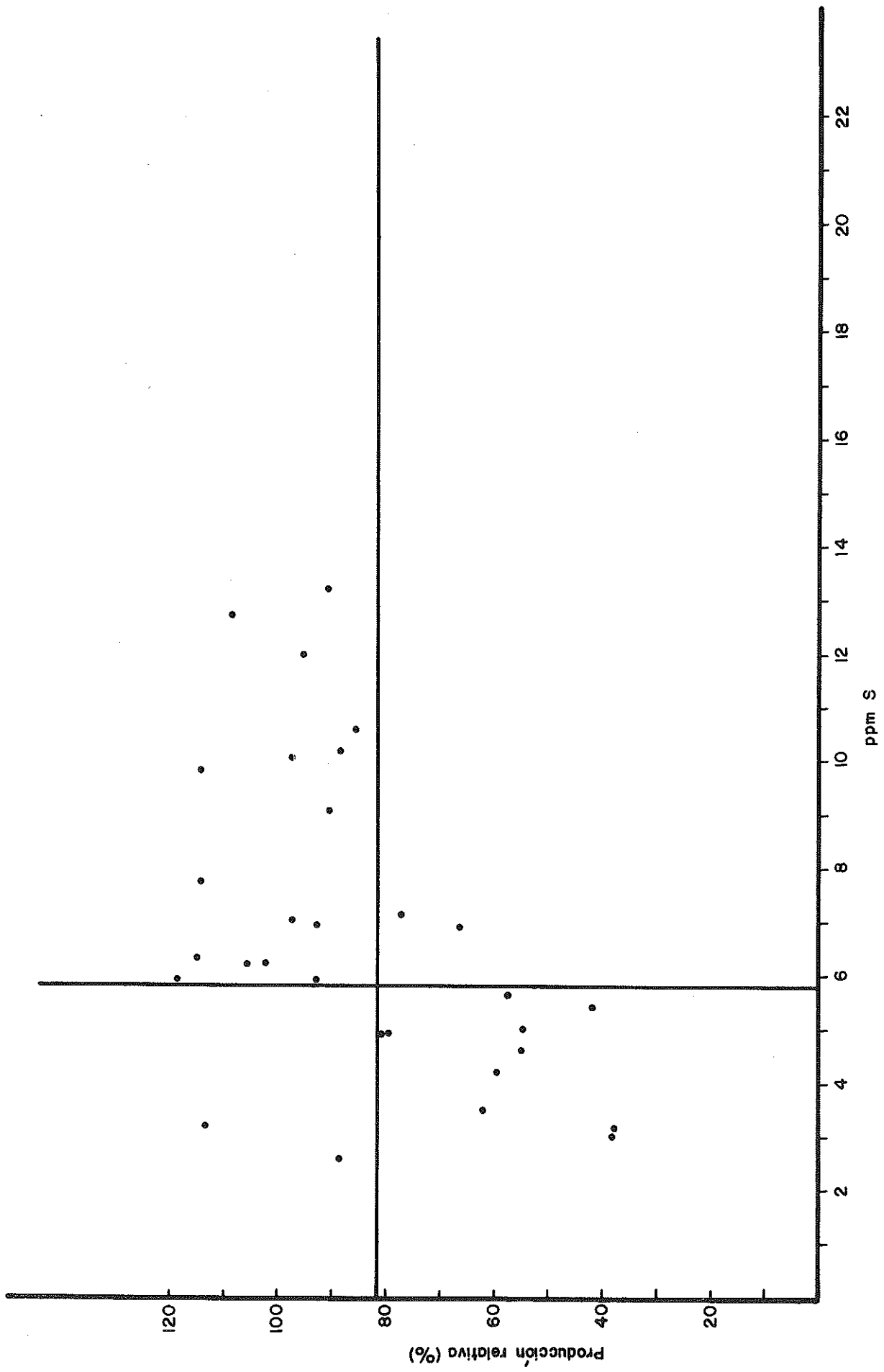


Fig. 4 — Relación entre el azufre extraído de los suelos por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$ y los rendimientos relativos de Materia Seca.

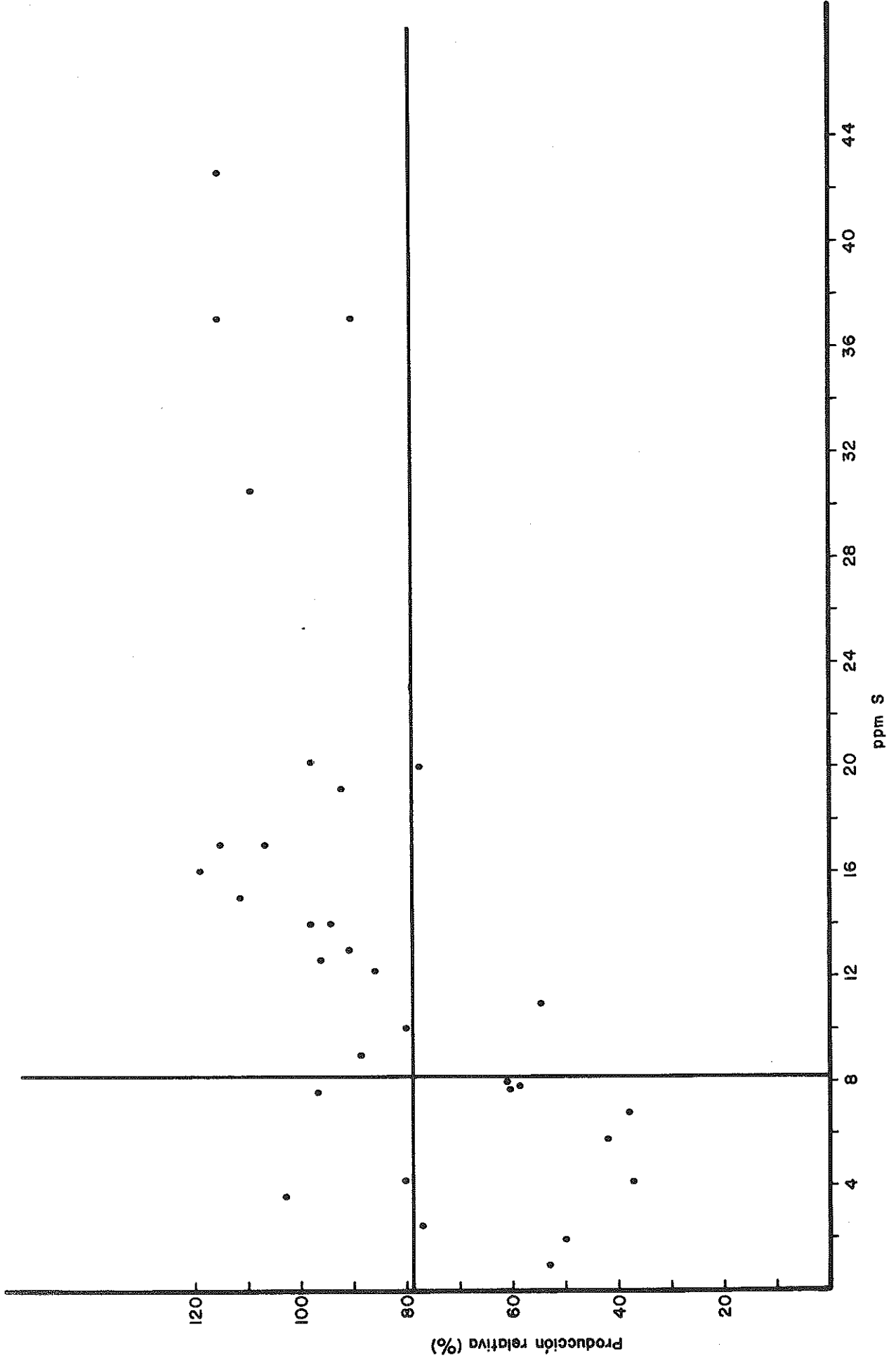


Fig. 5 - Relación entre el azufre extraído de los suelos por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ y los rendimientos relativos de Materia Seca.

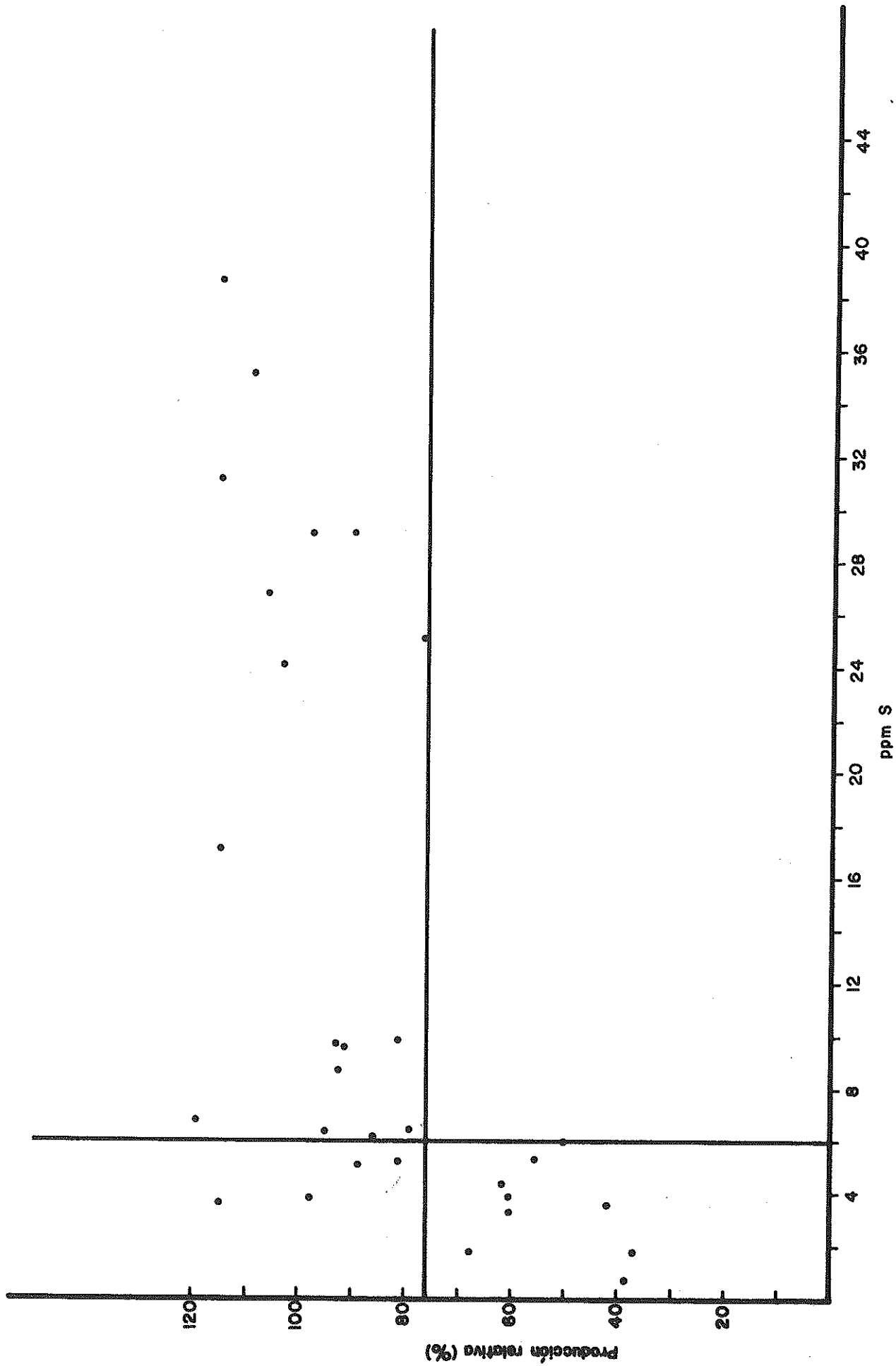


Fig. 6 -- Relación entre el azufre extraído de los suelos por el método de KHPO_4 y los rendimientos relativos de Materia Seca.

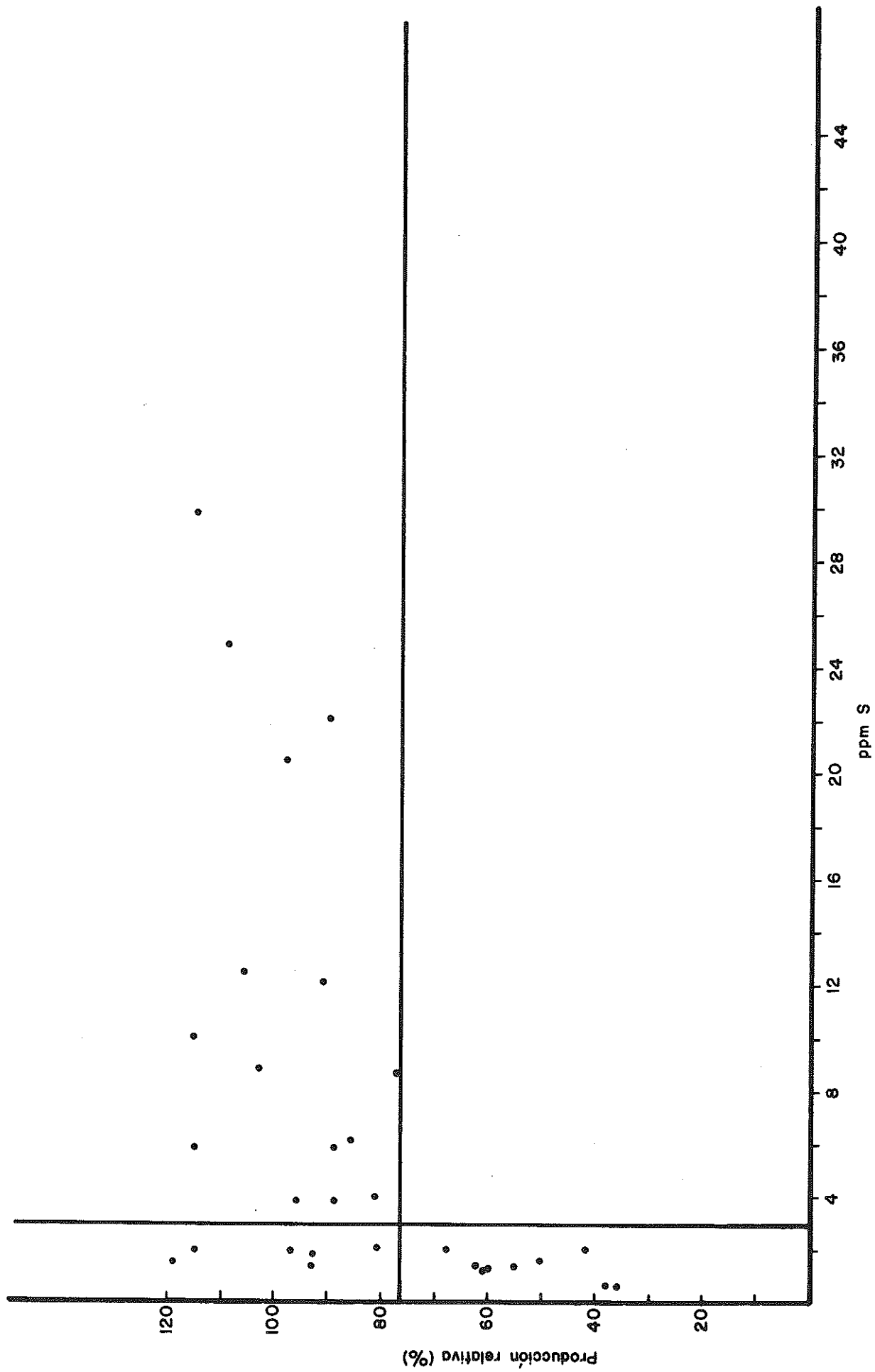


Fig. 7 - Relación entre el azúfre extraído de los suelos por el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 - \text{CaCl}_2$ y los rendimientos relativos de Materia Seca.

5. DISCUSION

5.1 Propiedades químicas de los 30 suelos

Los valores de pH determinados en los suelos con agua y cloruro de potasio tienen una diferencia, en la mayoría de los suelos próximos a la unidad. En muchos suelos el contenido de materia orgánica varía de mediano a alto, considerando como valores altos los superiores a 5 por ciento. El contenido de nitrógeno para estos suelos presenta, en general, una tendencia similar a la de la materia orgánica. El contenido de potasio de la mayoría de los suelos es alto. Los valores de Mg encontrados en los suelos están de mediano a bajo, tomando en cuenta 6 meq/100 g de suelo como valor alto (34a). Los contenidos de calcio en los suelos son bajos, considerando 24,0 meq/100 g como valor alto.

Con respecto a las relaciones Mg/K, Ca/Mg y Ca+Mg/K se ve que los valores Mg/K son bajos en la mayoría de los suelos, mientras que para el Ca/Mg dominan los valores altos. Sin embargo, las relaciones Ca+Mg/K son por lo general bajas, considerando los estándares 8,0; 4,0 y 40,0 respectivamente, descritos por Hardy (34a).

5.2 Respuesta de los suelos al azufre

La respuesta a las aplicaciones de azufre en los suelos se manifiesta claramente en el 36 por ciento de los 30 suelos estudiados. El hecho de que estos suelos hayan respondido positivamente a las aplicaciones de azufre indica que el contenido de azufre disponible para el cultivo de sorgo, bajo las condiciones en que se realizó el experimento, puede ser un factor que limita los rendimientos del cultivo.

Una razón a la que podría atribuirse el bajo contenido de azufre disponible en estos suelos es el hecho de que la mayoría de los suelos que respondieron al azufre aplicado provienen de áreas con altas precipitaciones pluviales y con drenaje superficial bueno, factores

estos que constituyen condiciones adecuadas para la lixiviación de los sulfatos a zonas donde no son aprovechados por las plantas.

Según Harward y Reisenauer (36), las pérdidas de azufre por lavados de los suelos van desde cantidades insignificantes hasta cantidades superiores a los 320 kg de S/ha/año. Las deficiencias de azufre, atribuidas a pérdidas por lavados, según Fox, Olson y Rhoades (30), ocurren con frecuencia en suelos de textura gruesas con pH casi neutro, después de períodos de altas precipitaciones. También Martín y Walker (52) expresan que en áreas de deficiencias, los problemas de la movilidad de los sulfatos, se agudiza por el efecto del lavado ocasionado por el agua de lluvia o la irrigación con agua de bajos contenidos de azufre. Estos mismos autores informan que en algunos suelos de California, con una precipitación anual superior a 1500 mm se han observado claras deficiencias de azufre. Es importante mencionar que las zonas de donde provienen los suelos con respuesta al azufre tienen una precipitación que fluctúa entre 1853 y 3382 mm con un promedio de 2490 mm.

Los bajos rendimientos de materia seca obtenidos, tanto en los tratamientos testigos como en los con azufre en los suelos La Piñera-3, Volcán-4, Vara Blanca-18, Fundo La Fuente-22, Sanatorio Durán-21 y Juan Viñas-23, se debieron posiblemente a la presencia de un factor limitante no controlado. Esto puede ser atribuido a un desbalance ocasionado por la alta concentración de fósforo, sodio, potasio y magnesio, localizada en la superficie de las macetas (0-5 cm) como producto de la alta dosis aplicada, en el caso del fósforo y la forma como fueron aplicados, lo cual impidió un rápido y eficiente desarrollo de las raíces, ocasionando

así una fuerte disminución de los rendimientos. La presencia de las altas concentraciones de fósforo, sodio, potasio y magnesio, fue comprobada a través de análisis de estos suelos, realizados después de la cosecha tomando muestras de 0-5, 5-10 y 10-15 cm de profundidad en cada maceta, cuyos valores aparecen en el Cuadro 2 del Apéndice.

En algunos suelos (14, 19, 20 y 27) se presentó una reducción en los rendimientos de materia seca en los tratamientos con azufre, pero sólo se encontró estadísticamente significativa (LSD 0,05) en el suelo 20. Es difícil, basándose en los datos obtenidos, explicar este efecto negativo.

Por lo que respecta a concentraciones de azufre en el sorgo cultivado en este experimento, se ve que las plantas cosechadas en los tratamientos testigos de los suelos con respuesta positiva clara al azufre aplicado (suelos 2, 6, 9, 10, 11, 12, 25, 26, 28, 29 y 30) tienen un valor promedio de 280 ppm, mientras que las plantas cosechadas en los tratamientos con azufre, de los mismos, presentan valores promedio de 624 ppm, que representa un valor casi tres veces mayor al de los tratamientos testigos. Esto indica que la adición de azufre en estos suelos favorece la absorción de dicho elemento, permitiendo que la concentración en la planta supere el nivel de deficiencia, que ocasionaba la baja disponibilidad del azufre en estos suelos. La concentración de azufre encontrada en las plantas de los tratamientos testigos de estos suelos (280 ppm) se encuentra debajo de las concentraciones críticas encontradas por Ensminger y Freney (28) usando centeno, por Jones (43) y Jones y Martin (45) trabajando con gramíneas y leguminosas y Volk et al (73) empleando sorgo. Con base en lo anterior, puede afirmarse

que los bajos rendimientos en la producción de materia seca por el cultivo de sorgo son causados por el bajo contenido de azufre disponible en estos suelos, que limita el desarrollo normal del cultivo.

Por lo que respecta a las concentraciones promedio de azufre en las plantas del tratamiento testigo de aquellos suelos que no respondieron positivamente al azufre aplicado (suelos 1, 3, 4, 5, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 y 27), así como lo que muestran respuesta negativa, presentan valor ligeramente inferior al valor promedio de los tratamientos en que se aplicó azufre. Esto indica que la concentración de este elemento en la planta aumenta con la disponibilidad de éste en el suelo, es decir, que si el suelo contiene cantidades suficientes la planta puede absorber cantidades iguales o superiores a las requeridas para satisfacer sus necesidades fisiológicas. Basándose en lo anterior, puede señalarse que estos suelos en condiciones naturales contienen cantidades de azufre asimilable suficiente para producir rendimientos óptimos en ausencia de otros factores limitantes para este cultivo.

5.3 Evaluación de extractantes

El azufre extraído por el CaCl_2 no pudo ser determinado mediante la metodología de análisis empleado en este estudio. Esto se debió posiblemente a que según lo describen Ensminger y Freney (28) y Reisenauer *et al.* (64), esta solución sólo extrae el azufre rápidamente soluble, que por encontrarse en cantidades muy reducidas en la mayoría de los suelos, no fue posible su detección, pues sería necesario para ésto tomar una alícuota mayor que la empleada por el método modificado

por Massoumi y Cornfield (51).

Asimismo, los extractos obtenidos con los métodos acetato de amonio-ácido acético ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{-HOAc}$) y carbonato ácido de sodio-ácido acético ($\text{NaHCO}_3\text{-HOAc}$) no pudieron ser analizados, debido a las interferencias ocasionadas por la presencia en los filtrados del color amarillo. La aparición de este color en los extractos se debe a que según Ensminger y Freney (28), estos compuestos además del azufre adsorbido extraen fracciones del azufre orgánico, por lo que parte de la materia orgánica es desintegrada e incluida en los filtrados, dando a estos el color amarillo anteriormente citado. Este problema pudo haberse solucionado si en lugar de agitar los extractos con carbón activado, se hubiera tratado con agua oxigenada, pero debido a que el proceso es muy lento se decidió no proceder a analizarlos por lo tedioso e impráctico que resultaría este método para su uso en análisis químico de laboratorio. Por esta razón no se recomendaría el empleo de dicho método como extractante de azufre en estos suelos con materia orgánica de mediano a alto.

Por lo que respecta a cantidades de sulfatos extraídos por los métodos $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, KH_2PO_4 y $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$ (Cuadro 7), se nota que en general los cuatro métodos extraen cantidades considerables en la mayoría de los suelos, presentándose mayor uniformidad en las cantidades extraídas con el KH_2PO_4 y el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$. El KH_2PO_4 según Ensminger (27) extrae los sulfatos adsorbidos y los rápidamente solubles, mientras que el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, según Fox (30), además de extraer los mismos sulfatos, proporcionan un filtrado más claro,

debido a que los iones fosfatos desplazan los sulfatos adsorbidos, mientras que el ion calcio disminuye la extracción de la materia orgánica. Por estas circunstancias, dichos autores afirman que estos compuestos podrían ser ideales para extraer sulfatos del suelo.

Con excepción del azufre extraído del suelo Bataán con $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, los demás valores de azufre encontrados por los diferentes métodos en los suelos que respondieron a las aplicaciones de azufre son bajos, demostrándose con ésto la funcionalidad de los métodos, para predecir posibles respuestas al azufre aplicado.

Basándose en los coeficientes de correlación lineal (Cuadro 12), la cantidad relativa de azufre extraído, el rango y la desviación estándar de cada extractante (Cuadro 7), se piensa que el KH_2PO_4 es el método más confiable para predecir posibles respuestas al azufre, para los suelos incluidos en este experimento. Estos resultados concuerdan con los obtenidos con KH_2PO_4 por Jones *et al* (45) en suelos de Inglaterra y Gales, por Spencer y Freney (66) en estudios de varios procedimientos para estimar el azufre de los suelos.

De acuerdo a los coeficientes de correlación entre azufre extraído por los cuatro métodos (Cuadro 12) y el rendimiento relativo de materia seca, se ve que cualquiera de los cuatro métodos se podrían utilizar para predecir posibles respuestas, puesto que en todos los casos los coeficientes de correlación lineal son altamente significativo (99 por ciento de probabilidad).

Basándose en los coeficientes de determinación (R^2), determinados para las regresiones del azufre extraído por cada método vs los

rendimientos relativos de materia seca (Cuadro 13), se ve que los modelos semilogarítmico, logarítmico y Mitscherlich, son los que ajustan mejor a los datos, especialmente en los métodos de fosfato de potasio y fosfato de calcio-cloruro de calcio. Sin embargo, con base en estos coeficientes es difícil justificar el uso de estos modelos para una predicción exacta de respuesta en estos suelos a un nivel dado de azufre extraído.

Por lo que respecta a niveles críticos (Figuras 4, 5, 6 y 7), se ve que los valores encontrados por la técnica de Cate y Nelson (15) son seis, ocho, seis y tres ppm para el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, KH_2PO_4 y $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$, respectivamente. Esto indica que los suelos cuyos contenidos de azufre extraído estén por debajo de los valores anteriormente citados, para cada método tienen una alta probabilidad de respuesta al azufre aplicado, mientras que los suelos con valores de azufre superiores a estos niveles, tienen poca probabilidad de respuesta al azufre aplicado. Según Cate y Nelson (15) los niveles críticos son lo suficientemente definidos para ofrecer un valor de predicción considerable. Los gráficos en sí no proveen la base para hacer recomendaciones de cantidades de azufre a aplicar, pero según estos mismos investigadores, permiten la siguiente declaración: debajo del nivel crítico del suelo la probabilidad de una respuesta económica a azufre es alta (valores del análisis de suelo 'bajos'), mientras que por encima del nivel crítico hay una oportunidad pequeña de obtener una respuesta amplia (valores del análisis de suelo 'altos').

Como puede notarse al observarse los valores promedios de

azufre extraído (Cuadro 7) y los niveles críticos (Figuras 4, 5, 6 y 7), se encuentra que nueve de los suelos con respuesta positiva al azufre aplicado tienen valores de azufre extraído por debajo del nivel crítico establecido para el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$ que corresponde al valor seis ppm, mientras que los dos suelos restantes muestran valores ligeramente superiores a dicho nivel crítico. En un estudio de evaluación de varios extractantes de azufre con el cultivo de la alfalfa, Hoeft et al (37) encontraron para este método seis como nivel crítico, valor este igual al encontrado en el presente estudio para el cultivo de sorgo.

En el caso particular del $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, aparecen ocho de los once suelos con respuesta positiva al azufre, presentando valores por debajo del nivel crítico (8 ppm) determinado para este método, mientras que los restantes tres suelos muestran valores por encima de dicho valor crítico. Fox et al (30), evaluando el estado de azufre en suelos por análisis de planta y suelo, encontraron como nivel crítico para este método ocho ppm para el cultivo de maíz y diez ppm para el cultivo de la alfalfa. Asimismo, Grava (34) encontró valores de siete ppm de azufre para maíz y granos pequeños y doce ppm para alfalfa. Estos valores, aún cuando se han utilizado cultivos diferentes al empleado en el presente experimento, están próximos al nivel crítico encontrado.

Por lo que respecta al nivel crítico determinado para el KH_2PO_4 , se nota que diez de los once suelos con respuesta positiva al azufre presentan valores de azufre extraído inferiores al nivel crítico (seis ppm) determinado para este método, mientras que un suelo presenta valor superior al valor del nivel crítico.

En el método de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$ aparecen al igual que en el método KH_2PO_4 diez suelos con valores de azufre extraído por debajo del nivel crítico (tres ppm) estimado para el citado método, presentándose sólo un suelo con valor superior a dicho nivel crítico.

Basado en el criterio anteriormente expuesto, puede afirmarse que el KH_2PO_4 y el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$ dan las mejores predicciones de respuesta, puesto que en ambos casos se han presentado el mayor número de suelos con respuesta positiva al azufre con valores de azufre extraído por debajo del nivel crítico establecido. Sin embargo, las diferencias entre los extractantes no son marcadamente grandes por lo que una recomendación exclusiva para análisis rutinario de suelo de uno u otro método es un poco difícil.

Estos valores de niveles críticos determinados son una primera aproximación, puesto que sus estimaciones han sido basados en trabajos realizados bajo condiciones de invernadero, cuya utilidad sería de uso práctico para dar inicio a futuros trabajos de campo que permitan encontrar valores de niveles críticos bajo condiciones reales.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se establecen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Se encontró una respuesta significativa del sorgo a las aplicaciones de azufre bajo condiciones de invernadero en 12 de los 30 suelos estudiados.
2. Los métodos fosfato de potasio y fosfato de calcio fueron los que mejor correlacionaron con los rendimientos relativos de materia seca ($r = 0,57$), lo mismo ocurrió con la asimilación relativa de azufre, en cuyo caso los coeficientes de correlación fueron 0,62 y 0,55, respectivamente.
3. El método de Cate y Nelson es efectivo, de fácil manejo y de aplicación rápida para establecer niveles críticos tentativos de azufre en estos suelos.
4. Con fines de diagnóstico de necesidades de fertilizantes azufrados, son recomendados preliminarmente los métodos fosfato de potasio y fosfato de calcio como métodos de análisis químico de azufre asimilable en el laboratorio.
5. Es de recomendarse la continuación de este tipo de estudio a nivel de campo, para afinar los niveles críticos y empezar a hacer calibraciones para niveles de azufre por aplicar.

7. RESUMEN

La respuesta a aplicaciones de azufre en 30 suelos agrícolas de Costa Rica fue evaluada en un estudio de invernadero, usando como cultivo indicador el sorgo. Se probaron como métodos para análisis de azufre extraíble del suelo los extrayentes fosfato de calcio-ácido acético, fosfato de calcio, fosfato de potasio, fosfato de calcio-cloruro de calcio, cloruro de calcio, acetato de amonio, y bicarbonato de sodio-ácido acético.

Se eliminaron cloruro de calcio por las pequeñas cantidades de S extraídos y acetato de amonio y bicarbonato de sodio-ácido acético por problemas encontrados para analizar los filtrados por turbidimetría.

La efectividad de cuatro extractantes de azufre de suelos para predecir posibles respuestas a aplicaciones de azufre fue evaluada por medio de análisis de correlación entre el azufre extraído por cada método y el rendimiento relativo de materia seca y el azufre asimilado relativo. Se usó el método de Cate y Nelson para estimar niveles críticos de azufre para cada extrayente.

La producción de materia seca fue estadísticamente incrementada con la aplicación de 60 kg/ha de azufre en 12 de los 30 suelos utilizados.

Considerando el rango de azufre extraído, la desviación estándar y los coeficientes de correlación, los mejores métodos de extracción de azufre para predecir posibles respuestas fueron el fosfato de potasio y el fosfato de calcio, cuyos coeficientes de correlación son 0,57

para la producción relativa de materia seca y 0,62 y 0,55 para el azu-
fre asimilado relativo, respectivamente.

Los niveles críticos estimados para cada método fueron seis ppm
para el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$, ocho ppm para el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, seis ppm para el
 KHPO_4 y tres ppm para el $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$.

7a. SUMMARY

Response to sulphur applications was evaluated for 30 Costa Rican soils in greenhouse experiments, using sorghum as an indicator.

The following reagents were tested for extractable sulphur analysis: calcium phosphate-acetic acid, calcium phosphate, potassium phosphate, calcium phosphate-calcium chloride, calcium chloride, ammonium acetate and sodium bicarbonate-acetic acid.

Reagents CaCl_2 , NH_4OAc and $\text{NaHCO}_3\text{-NH}_4\text{OAc}$ were discarded because of the small amounts of sulphur extracted, due to the problems met in analyzing the filtrate with turbidimetry.

Effectivity of four soil-sulphur extractants were tested from correlation analysis between extracted S with each method and relative yields of dry matter and relative assimilated S, in order to predict possible responses to sulphur applications. Cate and Nelson's method was used for estimating critical levels of sulphur for each extractant.

Dry matter production increased statistically with application of 60 Kg/ha sulphur in 12 out of 30 soils studied.

Considering the range of extractable S, standard deviation and correlation coefficients, the best methods for sulphur extraction for predicting possible responses were potassium phosphate and calcium phosphate whose correlation coefficients were 0.57 for relative production of dry matter, and 0.62 and 0.55 for relative assimilated sulphur, respectively.

Estimated critical levels for each method were six ppm for $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-HOAc}$, eight ppm for $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, six ppm for KHPO_4 and three ppm for $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\text{-CaCl}_2$.

8. LITERATURA CITADA

1. AGUIRRE, A. 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. 145 p.
2. ALVARADO HERNANDEZ, A. Estudio edafológico y agrológico de las sabanas de Buenos Aires de Puntarenas. Tesis Ing. Agr. San José, Universidad de Costa Rica, 1970. 116 p.
3. ASSOCIATION OF OFFICIAL AGRICULTURAL CHEMISTS. Official methods of analysis, 9th ed. Washington, D.C., 1960. 1,008 p.
4. BANDSLEY, C. y KILMER, V. Sulfur supply of soil and crop yield in the southeastern United States. Soil Science Society of America Proceedings 27:197-199. 1963.
5. _____ y LANCASTER, J. Sulfur. In Black, C. A. eds. Methods of soils analysis. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 1102-1116.
6. BARRETO MUSKUS, F. Estudio agrológico detallado de las fincas de la Escuela Agrícola y Colegio Agropecuario Santa Clara. Tesis Ing. Agr. San José, Universidad de Costa Rica, 1973.
7. BEATON, J. y BURNS, G. Determination of sulphur in soils and plant material. Washington, Sulphur Institute, Technical Bulletin no. 11. 1965. 16 p.
8. _____ y BURNS, G. Determination of sulphur in soil and plant material. Washington, Sulphur Institute, Technical Bulletin no. 14. 1968. 56 p.
9. BIXBI, D. y RUCKER, D. Adding plant nutrient sulphur to fluid fertilizers. Washington, Sulphur Institute, Technical Bulletin no. 11. 1965. 18 p.
10. BLASCO, M. Contenido y metabolismo de azufre en suelos de Centro América. In Panel sobre Suelos Volcánicos de América, 2o. Pasto, Colombia, 1972. (en prensa).
11. BOUYOUCOS, G. The hydrometer method for studying soil. Soil Science Society of America Proceedings 25:365-369. 1961.
12. BOWER, C., REITEMEIER, R. y FIREMAN, M. Exchangeable cation analysis of saline and alkaline soils. Soil Science 73:251-261. 1952.

13. BREMMER, J. M. Total nitrogen. In Black, C. A. et al. eds. Methods of soil analysis. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy, 1965. pp. 1171-1175.
14. BURBANO, H. Metabolismo del azufre en suelos de Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1973. 93 p.
15. CATE, R. B. y NELSON, L. A. A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data. North Carolina State University. International Soil Fertility Evaluation and Improvement Program. Technical Bulletin no. 1. 1965. 23 p.
16. CHAO, T., HARWARD, M. y FANG, S. Movement of S³⁵ tagged sulfate through soil comuns. Soil Society of America Proceedings 26(1):27-32. 1962.
17. _____ et al. Cationic effect on sulfate adsorption by soils. Soil Science Society of America Proceedings 37(1):35-38. 1973.
18. CHAPMAN, H., ed. Diagnostic criteria for plant and soils. Riverside, University of California, Division of Agricultural Science, 1966. pp. 44-475.
19. COLEMAN, R. The importance of sulfur as a plant nutrient in world crop production. Soil Science 101:230-239. 1966.
20. CORDERO, A. y SALAS, J. Evaluación de la fertilidad de tres suelos aluviales de Costa Rica mediante el método de las microparcelas de maíz. Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Boletín Técnico no. 58. 1971. 30 p.
21. _____ y SALAS, J. Problemas de fertilidad de algunos suelos de Guanacaste bajo explotación ganadera. Noticiero de Agronomía (Costa Rica) 1(9):1972. 4 p.
22. COOPER, M. A comparison of five methods for determining the sulphur status of New Zealand soils. In: International Congress of Soil Science, 9, Adelaide, Australia, 1968. Transactions. Sydney, ISSS and Angus and Robertson, 1968. v. 2, pp. 263-271.
23. CROCKER, W. Sulphur deficiency. Soil Science 60:149-154. 1945.
24. DEVLIN, R. Fisiología vegetal. Trad. del inglés por Javier Llimosa. Barcelona, Omega, 1970. 614 p.
25. DIAZ-ROMEU, R. y BALERDI, F. Determinación de la capacidad de intercambio de cationes. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1967. 3 p.

26. DOMINGUEZ, G. y RODRIGUEZ, C. Estudio sobre algunos aspectos de azufre en el altiplano de Pasto. Tesis Ing. Agr. Pasto, Colombia, Universidad de Mariño, 1971. 77 p.
27. ENSMINGER, L. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 18:259-264. 1954.
28. _____ y FRENEY, J. R. Diagnostic techniques for determining sulfur deficiencies in crops. *Soil Science* 101(4):283-290. 1966.
29. FASSBENDER, H. Química de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA. 217 p. 1972.
30. FOX, R., OLSON, R. y RHOADES, H. Evaluating the sulfur status of soil by plant and soil test. *Soil Science Society of America Proceedings* 28:243-246. 1964.
31. FORSYTHE, W. Manual de laboratorio de física de suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 217 p.
32. FRENEY, J. Some observations on the nature of organic sulphur compounds in soil. *Australian Journal of Agriculture Research* 12:424-432. 1961.
33. GRANADOS, M. Mineralización del azufre en suelos bajo cultivo de cacao. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 57 p.
34. GRAVA, J. The sulfur picture in Minnesota. *Sulphur Institute Journal* 7:12-14. 1971.
- 34a. HARDY, F. Edafología Tropical. Traducido del inglés por Rufo Bazán. México, D. F., Herrero, 1970. 416 p.
35. HARRIS, S. A., NEUMANN, A. M. y STOUSE, P. The major soil zones of Costa Rica. *Soil Science* 112(6):439-447. 1971.
36. HARWARD, M. y REISENAUER, H. Movement and reactions of inorganic soil sulfur. *Soil Science* 101:326-335. 1966.
37. HOEFT, R., WALSH, L. y KEENEY, D. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. *Soil Science Society of America Proceedings* 37(3):401-408. 1973.
38. HOLDRIDGE, L. Mapa ecológico de Costa Rica. Turrialba, IICA, 1959. Escala 1:1.000.000.

39. HUNTER, A. Suggested laboratory and greenhouse nutrient survey studies to determining the soil ammendments required for soil to obtain optimum plant growth. North Carolina State University. Raleigh, N. C. International Soil Fertility Evaluation and Improvement Program. (mimeographed).
40. _____. Soil analysis procedure using the modified NaHCO_3 extracting solution. Raleigh, N.C., North Carolina State University. International Soil Fertility Evaluation and Improvement Program, s.f. 6 p.
41. JACKSON, M. L. Soil chemical analysis. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1964. p. irr.
42. JIMENEZ, F. Génesis, clasificación y capacidad de uso de algunos suelos de la región atlántica de Costa Rica. Tesis Ing. Agr. San José, Universidad de Costa Rica, 1972. 180 p.
43. JONES, M. Total sulfur and sulfate-sulfur content in subterranean clover as related to sulfur responses. Soil Science Society of America Proceedings 26:482-484. 1962.
44. _____ y MARTIN, W. Sulfate sulfur concentration as an indicator of sulfur status in various California dry land pasture species. Soil Science Society of America Proceedings 28:539-541. 1964.
45. JONES, L. et al. Plant-available and extractable sulfur in some soils of England and Wales. Soil Science 114(2):104-115. 1972.
46. JONES Gr., J. B. y ECK, H. V. Plant analysis as an aid in fertilizing corn and grain sorghum. In Walsh, L. M. y Beaton, J. D., eds. Soil testing and plant analysis. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America Proceedings. pp.349-364. 1973.
47. KAMPRATH, E., NELSON, W, y FITTS, J. The effect of pH, sulfate and phosphate concentration on the adsorption of sulfate by soils. Soil Science Society of America Proceedings 20:463-466. 1956.
48. LOWE, L. Sulfur fractions of select Alberta soil profiles of the chernozemic and podzolic orders. Canadian Journal of Soil Science 45(3):297-303. 1965.
49. _____ y DeLONG, W. Aspects of the sulphur status of three Quebec soils. Canadian Journal of Soil Science 41:141-146. 1961.
50. LAWTON, K. Chemical composition of soil. In Bean, F. Chemistry of soil. New York, Reinhold, 1955. pp. 53-84.

51. MASSOUMI, A. y CORNFIELD, A. A rapid method for determining sulfate in water extracts of soils. *Analyst* 88:321-322. 1963.
52. MARTIN, W. y WALKER, T. Sulfur requirements and fertilization of pasture and forage crops. *Soil Science* 101(4):248-257. 1966.
53. _____ y CORNFIELD, A. Total sulphur and water soluble sulphate contents of soil and their relations with their soil properties. *Journal of Food and Agriculture* 15:623-625. 1964.
54. McCLUNG, A., DeFREITA, L. y LOTT, W. Analysis of several Brazilian soils in relation to plant response to sulfur. *Soil Science Society of America Proceedings* 23:221-224. 1959.
55. McLEAN, E. Aluminium. *In* Black, C. A. *et al.*, eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy. pp. 978-998. 1965.
56. MINER, G. y CORDERO, A. A field research for obtaining interpretation data. *In* Seminario de Manejo de Suelos Tropicales, I. Cali, Colombia, 1974.
57. MULLER, L. Deficiencia de azufre en algunos suelos de Centro América. *Turrialba (Costa Rica)* 15(3):208-215. 1965.
58. NATIONAL PLANT FOOD INSTITUTE. *The fertilizer handbook*, 2 ed. Washington, D.C. 1963. pp. 54-55.
59. OLSEN, S. Phosphorus. *In* Black, C. A. *et al.*, eds. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin. American Society of Agronomy, 1965. pp. 1035-1049.
60. PEECH, M. *et al.* *Methods of soil analysis for soil fertility investigations*. U.S. Department of Agriculture. Circular no. 757. 1947. 25 p.
61. RAMOS, L. Influencia de la lixiviación de aniones en pérdidas por arrastre de cationes. San José, Servicio Técnico Interamericano de Cooperación Agrícola, 1958. 31 p.
62. RAND, R. *et al.* Availability and crop response to sulfur in Wisconsin. University of Wisconsin. College of Agriculture and Life Sciences. Research report no. 52. 1969. p. irr.
63. REHM, G. y CALDWELL, A. Sulfur supplying capacity of soils and the relationship of soil type. *Soil Science* 105:355-361. 1968.
64. REISENAUER, H.M., WALSH, L. M. y HOEFT, R. G. Testing soils for sulphur, boron, molybdenum and chlorine. *In* Walsh, L. M. y Beaton, J. D., eds. *Soil testing and plant analysis*. Madison, Wisconsin, Soil Science Society of America Proceedings. pp. 349-364. 1973.

65. SAIZ DEL RIO, J. R. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos: Métodos de laboratorio para diagnóstico de fertilidad. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 107 p.
66. SALINAS, J. Efecto de la inoculación y la fertilización nitrogenada sobre la producción de la soya. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1973. 68 p.
67. SCHALSCHA, E., ESTRADA, C. y GALINDO, G. Sulphur status of some volcanic ash derived soils. *Agrochimica* 16:77-82. 1971-1972.
68. SPENCER, K. y FRENEY, J. A comparison of several procedures for stimulating the sulfur status of soils. *Australian Journal of Agriculture Research* 11:948-959. 1960.
69. TEUSCHER, H. y ADLER, R. The soil and its fertility. New York, Reinhold, 1960. 46 p.
70. TISDALE, S. y NELSON, W. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Trad. por Jorge Balasch, Barcelona, Montaner y Simón, 1970. 760 p.
71. ULRICH, A. et al. Plant analysis. Analytical methods. California Agricultural Experiment Station. Bulletin 766. 1959. p. irr.
72. VIVES, L. Tabulación para uso agrícola de los datos climáticos de Costa Rica. San José, Universidad de Costa Rica, 1971. 222 p.
73. VOLK N., J. et al. Supplements to high analysis fertilizers with special reference to sulfur, calcium, magnesium, and limestone. *Soil Science* 60:427-435. 1945.
74. WALKER, D. y DOORNENBAL, G. Soil sulfate II. As an index of sulfur availability to legumes. *Canadian Journal of Soil Science* 52:261-266. 1972.
75. WAUGH, D. y FITTS, J. Soil test interpretation studies: laboratory and potted plant. North Carolina State University. International Soil Fertility Evaluation and Improvement Program. Technical Bulletin no. 3. 1966. 33 p.
76. WHITEHEAD, D. Soil and plant nutrition aspect of the sulfur cycle. *Soils and Fertilizers* 27:1-8. 1964.
77. WILLIAMS, C. y STEIMBERGS, A. Soil sulphur fraction as chemical indices of available sulphur in some Australian soils. *Australian Journal of Agriculture Research* 10:340-352. 1959.

APENDICE

Cuadro 1. Ecuaciones propias para cada modelo con los diferentes métodos de extracción: en donde \hat{Y} = valor estimado del rendimiento relativo y X = azufre extraído.

FOSFATO DE CALCIO-ACIDO ACETICO

$$\hat{Y} = 102,3 (1 - e^{-0,34x})$$

$$\hat{Y} = 58,7 + 3,8 x$$

$$\hat{Y} = 36,28 + 26,49 \log x$$

$$\log \hat{Y} = \log 39,6 + 0,39 \log x$$

$$\hat{Y} = 12,45 - 0,56x + 30,7x^2$$

FOSFATO DE CALCIO

$$\hat{Y} = 100,2 (1 - e^{-0,19x})$$

$$\hat{Y} = 65,48 + 1,3x$$

$$\hat{Y} = 38,78 + 18,98 \log x$$

$$\log \hat{Y} = \log 43,79 + 0,25 \log x$$

$$\hat{Y} = 3,40 - 0,05x + 51,08x^2$$

FOSFATO DE POTASIO

$$\hat{Y} = 100,08 (1 - e^{-0,34x})$$

$$\hat{Y} = 69,51 + 1,22x$$

$$\hat{Y} = 65,48 + 14,30 \log x$$

$$\log \hat{Y} = \log 49,99 + 0,23 \log x$$

$$\hat{Y} = 3,57 - 0,06 + 58,85x^2$$

FOSFATO DE CALCIO-CLORURO DE CALCIO

$$\hat{Y} = 98,99 (1 - e^{-0,85x})$$

$$\hat{Y} = 74,12 + 1,54x$$

$$\hat{Y} = 50,49 + 16,54 \log x$$

$$\log \hat{Y} = \log 61,66 + 1,02 \log x$$

$$\hat{Y} = 4,40 - 0,11 + 66,32x^2$$

Cuadro 2. Contenido de fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio de los suelos La Piñera-3, Volcán-4, Vara Blanca-18, Sanatorio Durán-21, Fundo La Fuente-22 y Juan Viñas-23, en las profundidades de las macetas comprendidas entre 0-5, 5-10 y 10-15 cm. analizados después de la cosecha.

Suelos	Profundidad cm	Fósforo ppm	Potasio ----- meq/100 g suelo	Calcio meq/100 g suelo	Magnesio meq/100 g suelo	Sodio -----
La Piñera	0-5	165,0	1,29	3,2	5,60	1,56
	5-10	35,0	0,51	1,8	0,90	0,57
	10-15	10,0	0,37	1,8	0,60	0,40
Volcán	0-5	152,5	1,13	3,1	3,99	0,96
	5-10	17,5	0,25	3,6	1,56	1,61
	10-15	15,0	0,28	2,8	1,05	0,83
Vara Blanca	0-5	62,5	1,95	3,4	4,92	1,44
	5-10	22,5	0,39	2,9	1,08	0,57
	10-15	25,0	0,38	3,3	1,62	0,48
San. Durán	0-5	155,0	2,31	5,9	6,27	0,48
	5-10	57,5	2,36	6,2	4,92	0,61
	10-15	50,0	2,41	6,5	4,89	0,87
F. La Fuente	0-5	252,5	2,36	6,5	5,70	7,53
	5-10	15,0	0,87	6,4	4,35	1,04
	10-15	12,5	1,23	6,9	4,20	1,44
Juan Viñas	0-5	155,0	1,03	3,2	2,97	4,57
	5-10	20,0	0,29	3,2	1,53	1,13
	10-15	16,0	0,24	3,0	1,47	0,83