

RETENCION DE SULFATOS Y RELACION FOSFATO—SULFATO EN SUELOS
DE COSTA RICA

Tesis de Grado
MAGISTER SCIENTIAE

Edgardo Ramírez González



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

RETENCION DE SULFATOS Y RELACION FOSFATO-SULFATO
EN SUELOS DE COSTA RICA

Tesis

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

Magister Scientiae

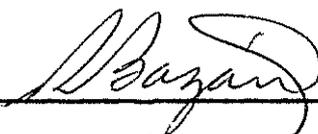
en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la O. E. A.

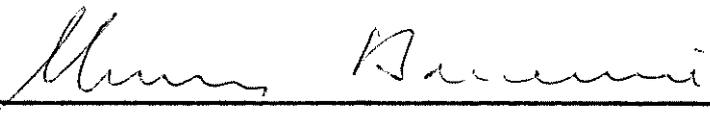
A PROBADA



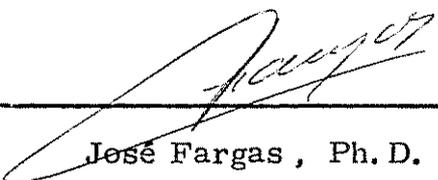
Donald D. Oelsligle, Ph. D. Consejero



Rufo Bazán, Ph. D. Comité



Elemer Bornemisza, Ph. D. Comité



José Fargas, Ph. D. Comité

Julio, 1974

DEDICATORIA

A Sandra Patricia e
Ingrid Giovanna
mis hijas

Al Dr. J. Nicolás Roulet
mi maestro

AGRADECIMIENTO

El autor agradece sinceramente al Dr. Donald D. Oelshlegel, Consejero Principal, por su valiosa orientación en la elaboración de la tesis y permanente apoyo durante los estudios.

A los Drs. Gilberto Páez y Eduardo Besoain, ex-miembros del Comité Consejero, por su colaboración en el Proyecto de Tesis.

A los Drs. Rufo Bazán, Elemer Bornemisza y José Fargas, miembros del Comité Consejero, por sus sugerencias.

Al Ing. Alvaro Cordero por su ayuda en la selección y recolección de los suelos empleados en el estudio y al Dr. Fausto Maldonado por su ayuda en la clasificación de los suelos.

Al Servicio de Cooperación Técnica del Gobierno Suizo, a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y al Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, por haber dado la oportunidad de realizar los estudios de postgrado y el presente trabajo de investigación.

A todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible llegar a buen fin esta tesis.

BIOGRAFIA

El autor nació en Recuay (Ancash) - Perú, el 16 de julio de 1941.

Realizó los estudios secundarios en el Colegio Nacional La Libertad-Huaraz y los profesionales en la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga de 1961 a 1965, graduándose de Ing. Rural en 1967. En 1966 ingresó al Programa de Pastos (Convenio Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga-Cooperación Técnica del Gobierno Suizo) en calidad de becado y luego como Asistente en Suelos hasta 1968. En 1969 paso a ser docente, como Profesor de Suelos en la misma Universidad y Responsable del Grupo de Suelos del Programa de Pastos, cargos que los ejerce en la actualidad.

En setiembre de 1972 ingresó a la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, en Turrialba, Costa Rica, para realizar los estudios de postgrado en la especialidad de Suelos, habiendo obtenido el grado de Magister Scientiae en julio de 1974

CONTENIDO

	<u>Página</u>
LISTA DE CUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1. INTRODUCCION.....	1
2. REVISION DE LITERATURA.....	3
2.1. Deficiencia de azufre.....	3
2.2. Fuentes y formas de azufre.....	4
2.3. Sorpción y desorpción del azufre.....	6
2.4. Formas de azufre y su distribución en el perfil.....	11
3. MATERIALES Y METODOS.....	13
3.1. Muestreo de suelos.....	13
3.2. Propiedades químicas y físicas.....	13
3.3. Estudios de azufre realizados.....	18
3.3.1. Retención de sulfatos.....	18
3.3.1.1. Método de Chao.....	18
3.3.1.2. Método de Kamprath.....	21
3.3.2. Estudio de la relación fosfato-sulfato.....	22
3.3.3. Formas de azufre y su distribución en el perfil.....	25
4. RESULTADOS.....	26
4.1. Retención de sulfatos.....	26
4.1.1. Método de Chao.....	26
4.1.2. Método de Kamprath.....	34
4.2. Estudio de la relación fosfato-sulfato.....	40
4.3. Formas de azufre y su distribución en el perfil.....	44
5. DISCUSION.....	52
5.1. Retención de sulfatos.....	52
5.2. Relación fosfato-sulfato.....	56
5.3. Formas de azufre y su distribución en el perfil.....	71
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
7. RESUMEN.....	76
7a. SUMMARY.....	78
8. LITERATURA CITADA.....	80
APENDICE.....	86

LISTA DE CUADROS

<u>Cuadro No.</u>		<u>Página</u>
1	Ubicación de las 30 muestras de suelos según la división territorial administrativa de Costa Rica...	15
2	Algunos datos meteorológicos y zonas de vida de los 30 sitios muestreados en Costa Rica.....	16
3	Color de suelos en seco, relieve, observaciones en el campo y clasificación de los 30 suelos de Costa Rica.....	17
4	Características químicas y textura de los 30 suelos de Costa Rica.....	19
5	Cantidad de S retenido a diferentes niveles de S ofrecido por 30 suelos en el estudio de retención con 2 métodos.....	27
6	Coefficientes de determinación (R^2) de la retención de SO_4^{2-} ajustados a tres modelos matemáticos de los 30 suelos estudiados.....	28
7	Coefficientes de determinación (R^2) de las isoterma de Langmuir y Freundlich de los 30 suelos de Costa Rica.....	31
8	La retención máxima (b) de sulfatos y la constante de energía de retención (k) en los 9 suelos que se ajustan a la isoterma de Langmuir.....	32
9	Ecuación y coeficientes de determinación de Freundlich calculadas para 21 suelos de Costa Rica.....	36
10	Cantidad de sulfato retenido, en promedio, a diferentes niveles de fosfato ($H_2PO_4^-$) y sulfato por los 11 suelos del estudio de la relación fosfato-sulfato..	41
11	Cantidad de fosfato ($H_2PO_4^-$) retenido, en promedio a diferentes niveles de fosfato y sulfato por los 11 suelos del estudio de la relación fosfato-sulfato...	42
12	Acidez, materia orgánica y formas de S en los perfiles de 30 suelos de Costa Rica.....	45
13	Coefficientes de correlación entre las diferentes formas de S, materia orgánica y pH determinados en los 30 perfiles de suelos de Costa Rica.....	51

<u>Cuadro No.</u>		<u>Página</u>
14	Parámetros de las ecuaciones de regresión cuadrática calculadas para los 11 suelos en el estudio de la relación fosfato-sulfato, para retención de $\text{SO}_4^{=}$ (a) y H_2PO_4^- (b).....	58
<u>APENDICE</u>		
1	Parámetros de las isotermas de retención de $\text{SO}_4^{=}$ ajustados a 3 modelos matemáticos de los 30 suelos.....	87
2	Análisis de variancia de la retención de sulfato y fosfato de los 11 suelos del estudio de la relación fosfato-sulfato.....	88
3	Análisis de variancia de la retención de sulfatos y fosfatos de los 11 suelos del estudio de la relación fosfato-sulfato.....	91

1. INTRODUCCION

En 1804 De Saussure reconoció al azufre como elemento esencial para las plantas, que lo consumen en cantidades iguales o ligeramente superiores al fósforo (12); pero ya en 1786 se descubrió que el uso del yeso estimulaba al cultivo, hecho que se le atribuye a Pastor Meyer, en Suiza (52).

Sin embargo, recién en los últimos años se ha prestado atención a este elemento al constatar que en muchas partes del mundo es el que afecta la producción de cosechas bajando los rendimientos y empobreciendo sobre todo la calidad de las proteínas (1), cuyas causas han sido bien explicadas por Coleman (31).

El suelo, sistema dinámico, tiene la capacidad de almacenar los elementos nutritivos que las plantas requieren y deben encontrarse en cantidades adecuadas para un desarrollo armonioso.

Es sabido por ejemplo que los aniones fosfato y sulfato son adsorbidos por los coloides del suelo en diferente grado y una gran parte de ellos pueden ser aprovechados por las plantas; pero por otro lado, cuando ambos aniones se encuentran presentes en la solución del suelo en diferentes concentraciones hay efectos que pueden producir desequilibrios causando lixiviaciones de sulfato que en última instancia significan pérdidas económicas. Es por esa razón que es importante estudiar el comportamiento individual de los iones y el efecto de uno sobre el o los otros en suelos de características diferentes.

En los suelos los elementos nutritivos se encuentran en diferentes formas y las plantas toman aquellas que se encuentran disponibles, las

restantes son consideradas como reserva; en consecuencia resulta de interés práctico e inmediato estudiar como se distribuyen esas fracciones de un elemento a través del perfil del suelo, para poder diseñar los procedimientos adecuados de manejo y fertilización de suelos.

Considerando la importancia que ha adquirido el estudio del azufre en el trópico y tomando como antecedentes los trabajos de Bornemisza (13), Bornemisza y Llanos (14) en suelos de la Meseta Central y Cordero (32, 33) en suelos del Pacífico Sur y Guanacaste se efectuó este trabajo exploratorio con 30 suelos agrícolas de Costa Rica de características físicas, químicas y climáticas diferentes.

Los objetivos fueron:

1. Determinar la capacidad de retención de sulfatos con dos métodos diferentes.
2. Estudiar la relación entre fosfato y sulfato en lo que se refiere a su retención en suelos.
3. Determinar las formas de azufre y su distribución a través del perfil del suelo.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 Deficiencia de azufre

Desde los tiempos de Liebig se sabe que el S es un elemento esencial para las plantas, el que es adicionado al suelo como impurezas supliendo las necesidades de los cultivos e impidiendo la manifestación de síntomas de deficiencias.

Con la producción de abonos más puros, al aumentar los rendimientos de los cultivos y al dejar de usar al S como fungicida e insecticida (31) los síntomas de deficiencia en este elemento se presentan cada vez más extendidos en el mundo hasta haber llegado a tener la importancia actual.

El primer incremento en la producción claramente atribuible al S se llevó a cabo en 1905 en un experimento de Dymond y colaboradores, citado por Martin y Walker (52). La primera respuesta en el campo americano, definitivamente atribuible al S se observó en un trabajo de Reimer en 1913, en Oregon, utilizando yeso y S (52). En 1918 se reportaron respuestas al S en California, en 1923 en Oregon y en Idaho y en 1925 en Washington (52).

De los estudios realizados en América Central se ha encontrado respuestas al abonamiento azufrado en suelos de El Salvador (57). Burbano (20) determinó que en algunos suelos de Nicaragua el S disponible extraído con fosfato de calcio se encuentra en niveles deficientes.

En Costa Rica, Cordero (22, 32) detectó suelos deficientes en S en la zona del Pacífico Sur y en Guanacaste; Martini (53, 54) estudiando la fertilidad de los llamados latosoles y andosoles de Costa Rica determinó que el S es un elemento que limita la producción en ambos tipos de suelos.

En los latosoles el subsuelo fue más deficiente mientras que en andosoles la deficiencia se presentó en suelo superficial y en subsuelo.

Otros autores reportan que el S cambiante varía (10), que no hay respuesta al S (41) o lo señalan como factor crítico en la producción (61).

Las deficiencias de S ocurren generalmente en suelos de buenos o excesivamente drenados, suelos arenosos bajo condiciones de lluvia alta, lo que no excluye a otras áreas (31). Martin y Walker (52) indican que las deficiencias de S no pueden ser relacionadas particularmente a ningún material madre sin embargo, Spencer (63) encontró que el S es el principal nutriente deficiente en cinco grandes grupos de suelos derivados de basalto.

2.2 Fuentes y formas de azufre

El azufre llega al suelo de diferentes fuentes, aparte de los abonos. Una de ellas es la roca madre, Whitthead (68) señala que las rocas ígneas no alteradas contienen de 0,05 a 0,3% de S mayormente como sulfuros de Fe, Ni y Cu; en las rocas básicas generalmente se encuentra más S que en las de tipo ácido.

Durante la meteorización de la roca madre, los sulfuros por oxidación se transforman en sulfatos y en suelos bien aireados la mayor cantidad de S inorgánico se encuentra en esta forma (45) que es como lo toma mayormente la planta (39).

Otra fuente del S del suelo son las aguas de lluvia que al atravesar la atmósfera arrastran formas de S (SO_2 , SO_3) y en zonas cercanas a áreas industriales el aporte en esta forma puede suplir prácticamente las necesidades de los cultivos (31).

Al igual que el N y el P, el S se encuentra en el suelo en formas **inor-**

gánicas y orgánicas, la suma da el S-total, cuya cantidad es muy variable en el suelo.

Whitehead (6) consigna valores comprendidos entre 22 y 3500 ppm para suelos de diferentes partes del mundo. Blasco (12) en un estudio de suelos de Centro América encontró que el promedio de S-total es de 1351 ppm correspondiendo los valores medios más bajos a Guatemala y los más altos a Costa Rica.

Burbano (20) en suelos de Nicaragua señala una variación del S-total entre 496 y 1325 ppm. Beaton y Burns (9) indican que el S-total del suelo puede variar de cerca de 0 a 0,06% (600 ppm), mientras que en suelos orgánicos puede estar sobre 0,5% (5000 ppm); muchos de los suelos, sin embargo, contienen entre 0,01 y 0,05 % (100 a 500 ppm).

La proporción de S-inorgánico y S-orgánico es también variable. Starkey (64) y Tabatabai y Bremner (65) reportan que en la capa superficial de la mayoría de los suelos predomina el S-orgánico, sin embargo, otros trabajos demuestran que predomina el inorgánico (13, 20).

Blasco (12) en suelos volcánicos encontró que el S se presenta mayormente en formas inorgánicas, siendo esto más evidente en los suelos de Costa Rica que en los de El Salvador, Guatemala y Nicaragua. La dominancia de una u otra forma de S debe estar ligada al clima que hace que se acumule o no materia orgánica en la capa superficial del suelo y a su velocidad de descomposición.

El S-orgánico del suelo constituye parte de la reserva de este elemento para el crecimiento de las plantas, pero para que pasen a formas asimilables deben sufrir transformaciones microbiológicas hasta llegar

a formas asimilables inorgánicas, aunque las plantas pueden tomar moléculas orgánicas relativamente pequeñas (52). Los responsables de los cambios bioquímicos son mayormente bacterias del género Thiobacillus (11) que tienen sus requerimientos de temperatura (óptima 35°C), humedad (mejor efecto cuando se aproxima a la capacidad de campo) y de pH (se ve un incremento de mineralización con incremento de pH).

Williams (69) determinó que la mineralización del S-orgánico sigue la misma tendencia que la del N-orgánico, aumentando en el verano y bajando en el invierno y primavera.

Bajo cultivo se mineraliza bastante el S-orgánico (47) fenómeno que difiere en suelos derivados de cenizas volcánicas y con dominancia de minerales amorfos porque la alofana con la materia orgánica forma complejos bastante estables con la materia orgánica que impide la mineralización del S-orgánico pudiendo presentarse deficiencia de S en suelos con alta materia orgánica (47).

2.3 Sorpción y desorción del azufre

Los sulfatos presentes en el suelo por adición o liberados por descomposición microbial están sujetos a diversos procesos físico-químicos que influyen en parte a que este elemento sea limitante en la producción agrícola.

Estudios en lisímetros por Lyon y Bizzel en 1918, citado por Jordan y Ensminger (44) mostraron que en el agua de drenaje sale de 3 a 6 veces más S que lo que sacan las cosechas. Crocker (34) indica que se pierden 45 kg/ha/año, mientras Jordan y Ensminger (44) presentan datos de Illinois de 35 a 55 lb/acre/año y en New York de 43 lb/acre/año. Ramos (59 b),

en suelos de Costa Rica, encontró que la pérdida de cationes por lavado es mayor cuando van con aniones móviles como el sulfato y el cloruro.

Chao y colaboradores (23) determinaron que el movimiento del S en el perfil del suelo depende de la cantidad de agua añadida para la lixiviación, del tipo del suelo y de la clase de abono utilizado independientemente del nivel de abonamiento.

Barrow y colaboradores (8) en suelos de Australia vieron que la adsorción de sulfatos se incrementó en áreas con lluvias de más de 30 pulgadas y lo explica probablemente debido a la baja del pH. También encontraron que la adsorción de sulfatos fue más grande en suelos derivados de rocas básicas que en las derivadas de rocas ácidas (8).

El lavaje de los sulfatos del suelo es afectado por el catión presente en la solución o en el complejo de cambio y el efecto es en el mismo sentido que la de la serie liotrópica de los cationes (39). Chao y colaboradores (26) determinaron que la magnitud de adsorción de los sulfatos sigue el orden: $\text{CaSO}_4 > \text{K}_2\text{SO}_4 > (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 > \text{Na}_2\text{SO}_4$ y la magnitud de la adsorción de sulfatos por suelos saturados de diferentes cationes siguió el orden de la valencia química: $\text{Al}^{+3} > \text{Ca}^{+2} > \text{K}^+$.

La influencia de los diferentes cationes mostró estar asociado a la naturaleza del catión y al pH y de ambos el pH es el que tiene mayor importancia. Este efecto de los diferentes cationes fue atribuida a posibles efectos de potenciales electrocinéticos y repulsión de aniones.

Barrow (8) estudiando el efecto de las concentraciones de calcio sobre la adsorción de aniones encontró que es mayor al aumentar la concentración del calcio en la solución, lo que sugiere que al aumentar este elemento

cambiable causa un aumento en los productos iónicos.

Otros de los factores es la fuerza de fijación de los iones en los coloides del suelo, se ha establecido el siguiente orden: Fosfato > sulfato > nitrato = cloruro (2, 27, 39, 51).

Mattson en 1927, citado por Jordan y Ensminger (44) demostró que el sulfato es adsorbido por algunos coloides del suelo y que la capacidad de adsorción sube al aumentar la acidez. Lichtenwalner en 1923, citado por Jordan y Ensminger (44) determinó la capacidad de adsorción de hidrogeles de hierro y aluminio y encontró que ellos adsorben sulfatos.

Overstreet y Dean en 1951, citado por Jordan y Ensminger (44) postularon que era similar el mecanismo, por el cual el cloruro, sulfato y fosfato son retenidos en un suelo ácido.

Muchos autores (6, 26, 35, 39, 45, 48) han demostrado que la adsorción de sulfatos depende del pH, siendo mayor según el medio sea más ácido. Arriba de pH 7,0 los sulfatos son muy poco retenidos.

El fenómeno de adsorción de sulfatos por los coloides del suelo ha sido estudiado ampliamente en el último decenio, debido a que el sulfato adsorbido puede ser una fuente importante de azufre para las plantas (4, 7, 36). Paralelamente se ha estudiado la desorción y el movimiento de los sulfatos a través del perfil del suelo.

Además de los factores señalados en el lavado y sorpción, solubilidad, fuerza de fijación y cationes presentes en la solución o en el complejo de cambio, existen otros que influyen grandemente en la adsorción de sulfatos y son por una parte los óxidos hidratados de hierro y aluminio.

Chao y colaboradores (28) cubriendo suelos poco retentivos de sulfatos

con óxidos hidratados lograron que estos mostraran la capacidad de retención de los latosoles y andosoles. También observaron que en el rango ácido la cantidad de sulfato adsorbido es esencialmente proporcional a las cantidades presentes de óxidos hidratados de hierro y aluminio, de los cuales los de aluminio son más efectivos en retener sulfatos.

El sistema con hierro aumentó su adsorción a medida que decreció el pH mientras que los óxidos hidratados de aluminio presentaron la máxima a pH 4, 0, la subsecuente disminución fue asociada a la disolución del hidróxido de aluminio.

Barrow (5) no encontró correlación entre la adsorción de sulfatos y el hierro extraído con citrato-ditionato, pero entre adsorción y aluminio extraíble con citrato-ditionato si hubo una relación. Chao y colaboradores (25) encontraron que tratamientos consistentes en remover la materia orgánica, óxidos libres de hierro y aluminio causaron una marcada reducción en la adsorción de sulfatos. Otros trabajos confirman estos resultados (26, 26).

Otro factor que influye en la adsorción de aniones en el suelo es el tipo de mineral de arcilla predominante. Neller (58) encontró que parecía haber alguna relación entre la cantidad de sulfatos y el tipo de arcilla. Posteriormente Chao y colaboradores (25) determinaron que la adsorción de sulfatos en referencia a la arcilla sigue el orden: Caolinita > ilita > bentonita; también encontraron que la naturaleza ácida de la arcilla es importante en el hecho de que las arcillas-A1 retienen más sulfato que las arcillas-H. Estos mismos autores sugieren el mecanismo de adsorción de la siguiente manera:

- a) Cambio de aniones debido a cargas positivas desarrolladas en óxidos hidratados de hierro y aluminio o en los bordes de los cristales de arcilla, especialmente a pH bajos.
- b) Retención de sulfatos por formación de complejos de hidróxidos de aluminio por coordinación.
- c) Adsorción de sal como resultado de la atracción entre los coloides de la superficie del suelo y de la sal.
- d) Propiedades anfóteras de la materia orgánica del suelo, la cual desarrolla cargas positivas bajo ciertas condiciones específicas.

Chang y Thomas (22) sugirieron que el mecanismo de adsorción de sulfatos consistía en el reemplazo de OH^- por SO_4^{-2} y la hidrólisis de aluminio (en presencia de sal) para formaciones H^+ ; los iones OH^- son neutralizados por los H^+ y la adsorción se realiza sin problemas. Chao y colaboradores (29) llegan a la misma conclusión al encontrar que el pH aumenta al aumentar la adsorción de sulfatos, que nos indica que hay desplazamiento de grupos OH^- , lo que fue confirmado también en suelos de Costa Rica (14).

Desde el momento que los fosfatos se fijan más fuertemente en el complejo de cambio del suelo, pueden crear dificultades en la retención de sulfatos. Ensminger (36) observó que en los suelos que habían recibido abono fosfórico durante varios años se encontraba poco sulfato retenido y Kamprath (45) comprobó que al aumentar la concentración de fósforo en la solución reducía la cantidad de sulfato adsorbido. Bornemisza y Llanos (14) y Chao y colaboradores (23, 24) llegan a las mismas conclusiones.

Una manera de medir la adsorción de los iones en el complejo de

cambio es usando las isotermas de Langmuir o la de Freundlich adaptadas ya que fueron calculadas y basadas en la teoría cinética de los gases y en su adsorción en sólidos. Para el caso de los sulfatos Chao y colaboradores (24) usando la isoterma de Freundlich encontraron que podían explicar el fenómeno de adsorción y Bornemisza y Llanos (14) llegaron a la misma conclusión. Una vez de las diferencias entre las dos ecuaciones es que la de Langmuir permite calcular la adsorción máxima (59) y la utilización de una u otra ecuación depende de la concentración de la solución de equilibrio (25).

2.4 Formas de azufre y su distribución en el perfil

Pocos estudios hay de la distribución del azufre y sus formas en perfiles de suelos de clima tropical húmedo y subtropical. Lowe (49) estudiando suelos chernozem y podzoles del Canadá concluyó que las formas orgánicas predominan en todos los horizontes superficiales y B, mientras que las formas inorgánicas alcanzaron altos niveles en el horizonte C de algunos chernozem. El mismo autor (50) en suelos gley del Canadá encontró valores más altos de S-total que en los chernozem y podzoles, el sulfato fácilmente soluble fue variable y el contenido de S-orgánico fue alto.

Cairns (21) detectó diferencias en el contenido y formas de S en perfiles de suelos que respondieron y no al abonamiento azufrado. Schalscha y colaboradores (62) en suelos derivados de cenizas volcánicas en Chile encontraron en todos los casos a excepción de uno, mayor contenido de S-adsorbido en el horizonte B.

En suelos de clima tropical húmedo y subtropical predominan minerales de arcilla tipo 1:1 o amorfos en caso de tener influencia de cenizas

volcánicas ya alteradas, porque las recientes no muestran adsorción de sulfatos (17). Usualmente el contenido de óxidos hidratados de Fe y Al en los horizontes B y C también son altos, lo cual resulta en mayores contenidos de S retenido en esos horizontes. Bornemisza y Llanos (14) encontraron esa tendencia en tres suelos de Costa Rica, mientras que Burbano (20) no obtuvo los mismos resultados en suelos de Nicaragua.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Muestreo de suelos

Para el estudio se tomaron muestras de suelo en 30 lugares de interés agropecuario recomendados por personal del Ministerio de Agricultura y Ganadería, y que incluyen casi la totalidad del territorio de Costa Rica, distribuidas de la siguiente manera:

Provincia de Puntarenas	7 muestras
Provincia de Guanacaste	8 muestras
Provincia de Alajuela	7 muestras
Provincia de San José	1 muestra
Provincia de Cartago	5 muestras
Provincia de Limón	<u>2 muestras</u>
Total	30 muestras

La ubicación de cada una de ellas se encuentra en la **Figura 1**. En los Cuadros 1, 2 y 3 se presentan respectivamente la ubicación de los sitios muestreados según la división territorial y administrativa del país, algunos datos meteorológicos y zonas de vida según la clasificación de L. Holdridge (66) y clasificación de suelos y algunas **observaciones** tomadas en el momento del muestreo que pueda ayudar a una mejor interpretación de los resultados.

El muestreo se hizo con barreno holandés, tomando cada 20 cm de profundidad una muestra hasta llegar a 1 m, de modo que por cada perfil se tomaron cinco muestras que fueron secadas al aire y pesadas por un tamiz de 2mm.

3.2 Propiedades químicas y físicas

En las muestras de 0-20 cm de profundidad se hicieron las siguientes

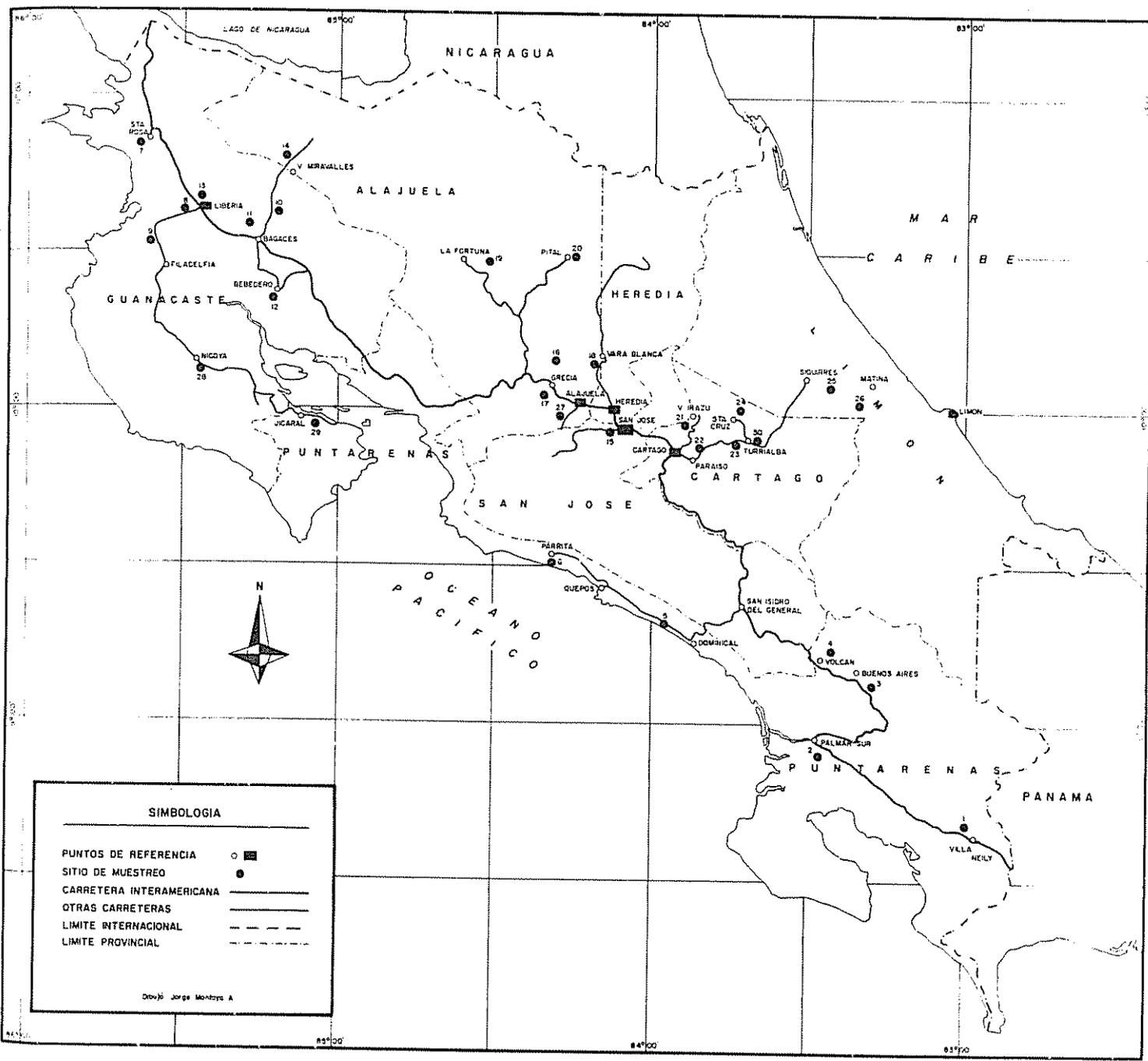


FIG 1- LOCALIZACION DE LOS SITIOS DE MUESTREO

Cuadro 1. Ubicación de las 30 muestras de suelo según la división territorial administrativa de Costa Rica.

No. de Identificación	Distrito	Cantón	Provincia
1. Caracol	Caracol	Golfito	Puntarenas
2. Palmar Sur	Palmar	Osa	Puntarenas
3. La Piñera	Buenos Aires	Buenos Aires	Puntarenas
4. Buenos Aires	Volcán	Buenos Aires	Puntarenas
5. Buena Vista	Savegre	Aguirre	Puntarenas
6. Parrita	Parrita	Parrita	Puntarenas
7. Santa Rosa	Nacascolo	Liberia	Guanacaste
8. La Flor	Liberia	Liberia	Guanacaste
9. Los Angeles	Liberia	Liberia	Guanacaste
10. Bagaces	Bagaces	Bagaces	Guanacaste
11. La Ceiba	Bagaces	Bagaces	Guanacaste
12. Taboga	Cañas	Cañas	Guanacaste
13. Las Pampas	Liberia	Liberia	Guanacaste
14. Colonia Blanca	Aguas Claras	Upala	Alajuela
15. Escazú	San Rafael	Escazú	San José
16. Coop. Victoria	San Isidro	Grecia	Alajuela
17. La Argentina	Puente de Piedra	Grecia	Alajuela
18. Vara Blanca	San Pedro	Poás	Alajuela
19. San Carlos	Fortuna	San Carlos	Alajuela
20. Pital	Pital	San Carlos	Alajuela
21. Irazú	Tierra Blanca	Cartago	Cartago
22. Birrisito	Paraíso	Paraíso	Cartago
23. Juan Viñas	Juan Viñas	Jiménez	Cartago
24. Palmira	Santa Cruz	Turrialba	Cartago
25. La Lola	Batán	Matina	Limón
26. Batán	Batán	Matina	Limón
27. Aeropuerto	Río Segundo	Alajuela	Alajuela
28. Nicoya	Nicoya	Nicoya	Guanacaste
29. Jicaral	Lepanto	Puntarenas	Puntarenas
30. Colorado	Turrialba	Turrialba	Cartago

Cuadro 2. Algunos datos meteorológicos y zonas de vida de los 30 sitios muestreados en Costa Rica*

Muestra No.	Elevación m. s. n. m.	Precipit. mm	Temp. Prom. °C	Zonas de Vida Clas. de Holdridge (66)	Estación Meteorológica
1	30	2647	27.4	BMHT	Coto 26
2	20	3282	26.0	BMHT	Palmar Sur
3	450	2680	26.0	BHT	La Piñera
4	500	3490	25.8	BHT	Volcán Buenos Aires
5	20	3902	---	BMHT	Quepos
6	30	3319	25.8	BHT	Parrita
7	144	1853	27.0	BHP	Liberia
8	50	1853	27.0	BHP	Liberia
9	100	1853	27.0	BST	Liberia
10	100	1853	27.0	BHP	Liberia
11	100	1853	27.0	BHP	Liberia
12	50	1853	27.0	BST	Liberia
13	150	1853	27.0	BHP	Liberia
14	--	2302	---	BPP	Upala
15	905	1678	23.1	BHP	Santa Ana
16	1043	2498	21.6	BMHP	Naranjo
17	825	2330	23.7	BMHP	La Argentina
18	1900	3020	---	BMHMB	Sto. Domingo del Roble
19	180	3268	27.2	BHT	Los Llanos
20	180	3268	27.2	BHT	Los Llanos
21	2337	2159	14.0	BHMB	Sanatorio Durán
22	1735	2277	17.3	BMHP	Pacayas
23	1735	2277	17.3	BMHP	Pacayas
24	2400	3304	9.6	BPM	Caliblanco
25	65	3286	25.3	BMHP	Siquirres
26	65	3286	25.3	BMHP	Siquirres
27	920	1882	22.6	BHP	El Coco
28	130	2232	27.0	BHT	Nicoya
29	30	2232	27.0	BHT	Nicoya
30	602	2236	22.2	BMHP	IICA, Turrialba

* Fuente: Tabulación para uso agrícola de los datos climáticos de Costa Rica. Luis Vives, Universidad de Costa Rica. 1971. 222 p.

BMHT	Bosque muy húmedo tropical
BMHP	Bosque muy húmedo premontano
BHT	Bosque húmedo tropical
BHP	Bosque húmedo premontano
BST	Bosque seco tropical
BPP	Bosque pluvial premontano
BMHMB	Bosque muy húmedo montano bajo
BHMB	Bosque húmedo montano bajo
BPM	Bosque pluvial montano

Cuadro 3. Color de suelos en seco, relieve, observaciones en el campo y clasificación de los 30 suelos de Costa Rica.

Muestra No.	Color 0-20 cm	Relieve	Observaciones	Clasificación (40)
1	10YR 5/4	plano	Cultivo de sorgo, aluvial	Inceptisol*
2	10YR 5/4	plano	Suelo labrado, aluvial	Inceptisol*
3	10YR 3/3	plano	Suelo labrado	Ultisol
4	10YR 4/4	plano	con pasto estrella	Ultisol
5	10YR 5/4	plano	napa freática a 60-80 cm	Entisol- Inceptisol
6	10YR 5/4	plano	suelo labrado	Inceptisol
7	10YR 5/3	plano	suelo sin cultivar	Entisol
8	10YR 5/2	plano	cultivo de arroz	Entisol
9	10YR 3/3	plano	moteado a 80 cm	Alfisol
10	10YR 4/2	pendiente ligera	cultivo de pastos	Entisol
11	10YR 4/1	En depres.	moteado a 60 cm	Entisol
12	7.5YR 3/2	plano	suelo labrado	Entisol- Inceptisol
13	10YR 5/3	plano	suelo labrado	Entisol
14	7.5YR 4/4	---	---	Ultisol
15	10YR 3/2	pendiente ligera	potrero de jengibre	Inceptisol*
16	7.5YR 4/4	pendiente ligera	pasto estrella y gigante	Inceptisol*
17	10YR 4/4	pendiente ligera	recién quemado	Alfisol- Ultisol
18	10YR 4/3	pendiente ligera	pasto natural	Inceptisol
19	10YR 3/3	plano	suelo labrado	Ultisol
20	10YR 3/3	plano	suelo labrado	Ultisol
21	10YR 3/2	pendiente regular	potrero de kikuyo	Inceptisol
22	10YR 3/3	pendiente regular	potrero de gramínea	Inceptisol*
23	10YR 3/4	pendiente regular	cultivo de pasto	Inceptisol
24	10YR 4/4	pendiente ligera	potrero de kiluyo	Inceptisol
25	10YR 5/4	plano	plantación de cacao	Entisol
26	10YR 5/4	plano	napa freática a 1m	Entisol
27	10YR 3/3	plano	napa freática a 70 cm	Inceptisol*
28	10YR 3/4	pendiente l.	potrero de gramínea	Alfisol
29	10YR 3/2	plano	suelo labrado	Alfisol
30	10YR 3/4	pendiente l.	plantación de árboles	Inceptisol

* Comunicación personal del Dr. F. Maldonado

determinaciones: pH en agua y en KCl 1N con potenciómetro Beckman mod. 96 usando la relación suelo:solución = 1.0:2.5; materia orgánica por el método de Walkley y Black modificado por Saiz del Río y Bornemisza (60); capacidad de intercambio catiónico con acetato de amonio 1N pH 7.0; cationes cambiabiles (Ca, Mg, K y Na) determinados con espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer 303; aluminio cambiabile extraído con KCl 1N y determinado por absorción atómica; nitrógeno total con semi-micro Kjeldahl utilizando como catalizador la mezcla de sulfato de cobre+ sulfato de potasio y selenio, según Bremner (19); fósforo disponible extraído con Olsen modificado (bicarbonato de sodio + EDTA + Superflock) (43); y textura por el método del hidrómetro (18). Los resultados se presentan en el Cuadro 4, y han sido discutidos por Pérez (59 a).

3.3 Estudios de azufre realizados

Con las 30 muestras de 0-20 cm de profundidad se hicieron los siguientes estudios específicos:

3.3.1 Retención de sulfatos

Para determinar la capacidad de retención de sulfatos de los 30 suelos en estudio se usaron dos métodos con el objeto de compararlos, uno de ellos es el de Chao (25) que es el más empleado razón por la que utilizamos soluciones de varias concentraciones de S y el otro es el de Kamprath, que se usa más en la confección de curvas de fijación de P (67), razón por la que tomamos solo dos niveles con el objeto de comparar las cantidades de S retenido por los suelos con ambos métodos al mismo nivel de S ofrecido y ver si están relacionados.

3.3.1.1 El método descrito por Chao y colaboradores (25) busca llegar a equilibrio cinético entre la cantidad de S o sulfato retenido

Cuadro 4. Características químicas y textura de los 30 suelos de Costa Rica.

Muestra No.	pH Agua	pH KCl	M.O. %	N %	P-disp. ppm	Ca	Mg meq/100 g suelo	K	Na	Al	Clase Textural
1	4.7	3.7	1.1	0.2	0.6	33.0	4.9	5.0	0.6	0.9	Fr
2	5.7	4.9	5.4	0.4	3.3	20.7	2.4	1.0	0.3	0.0	FrL
3	5.0	4.1	9.2	0.4	0.5	0.3	0.2	0.4	0.2	1.7	FrArA
4	5.4	4.2	9.5	0.4	0.4	1.1	0.4	0.3	0.2	0.9	FrAr
5	5.4	4.2	2.9	0.3	1.5	27.3	4.4	0.9	0.5	0.0	FrAr
6	5.7	4.7	1.4	0.2	5.7	21.1	4.5	0.5	0.3	0.0	FrL
7	5.8	4.9	2.2	0.2	24.9	8.7	2.1	1.3	0.3	0.0	Fr
8	5.9	4.8	3.3	0.2	2.6	7.2	1.0	0.4	0.3	0.0	FrArA
9	6.9	5.9	7.3	0.4	6.7	19.4	1.7	1.5	0.3	0.0	Fr
10	6.2	5.2	7.7	0.4	2.8	11.6	1.7	0.7	0.2	0.0	FrA
11	5.7	5.0	4.2	0.3	4.6	18.1	4.7	0.2	0.5	0.0	FrAr
12	5.6	5.0	3.7	0.3	17.9	26.8	4.9	1.0	0.5	0.0	FrAr
13	5.9	5.0	3.8	0.3	4.3	6.7	0.9	1.1	0.2	0.0	FrAr
14	5.3	4.6	5.6	0.4	0.7	3.1	0.8	0.6	0.3	0.1	FrArAr
15	5.7	4.8	11.2	0.6	2.5	10.7	3.9	0.4	0.3	0.0	Fr
16	6.3	5.4	11.2	0.7	1.3	14.5	2.9	1.1	0.5	0.0	Fr
17	5.7	4.9	6.7	0.4	1.2	8.4	2.2	1.4	0.3	0.0	FrAr
18	5.1	4.6	17.3	0.7	1.7	1.3	0.5	0.4	0.4	0.3	FrA
19	6.0	5.2	3.0	0.3	0.9	13.1	1.6	1.9	0.4	0.0	FrArAr
20	4.8	4.4	4.5	0.4	0.4	6.1	1.1	1.1	0.3	0.0	ArA
21	5.8	4.8	5.9	0.4	16.4	5.7	1.8	2.1	0.2	0.0	FrA
22	5.4	4.8	17.4	1.4	0.0	8.0	2.7	1.2	0.3	0.0	Fr
23	5.0	4.3	18.9	1.2	3.9	2.0	1.0	0.4	0.4	0.9	FrA
24	5.2	4.7	17.7	1.1	1.8	1.9	0.8	0.2	0.5	0.0	FrL
25	5.7	5.1	2.3	0.2	8.1	29.8	4.8	1.1	0.3	0.0	FrA
26	6.0	5.1	4.6	0.3	3.0	36.9	3.1	1.2	0.5	0.0	FrL
27	5.3	4.8	6.6	0.4	0.8	9.6	3.3	0.7	0.3	0.0	FrA
28	5.4	4.4	8.6	0.4	0.7	22.6	4.5	0.3	0.5	0.0	Fr
29	5.2	4.6	6.9	0.4	4.8	33.0	6.9	1.2	0.4	0.0	FrArL
30	4.8	4.1	7.9	0.5	1.6	0.6	1.0	0.1	0.3	0.7	Fr-FrArA

Fr = Franco L = Limoso Ar = Arcilloso A = Arenoso

y el presente en la solución y consiste en agitar 5 g de suelo seco al aire con 25 ml de una solución de concentración conocida de S por una hora. Se deja en reposo toda la noche y luego se efectúa otra hora de agitación. La determinación de sulfatos se hizo por turbidimetría, en el sobrenadante, según el método de Massoumi y Cornfield (55) modificado por Hoefft (42).

Las concentraciones de las soluciones empleadas fueron:

0, 50, 100, 200, 300, 400, y 500 ppm S en solución o

0, 250, 500, 1000, 1500, 2000 y 2500 micro g S/g de suelo

Para establecer las tendencias de la retención de sulfatos (isoterma de retención) en los 30 suelos, se calcularon las ecuaciones de regresión probando tres modelos matemáticos:

Lineal $Y = a + bX$

Logarítmico $\log Y = \text{Log } b_0 + b_1 \log X$

Cuadrático $Y = a + b_1 X + b_2 X^2$

Donde:

Y = S retenido en micro g/ g de suelo

X = concentración de S en la solución inicial en ppm

a, b_0 , b_1 , b_2 = constantes

Para averiguar si el fenómeno de retención es de una sola capa (monomolecular) o de varias capas (multimolecular) se probaron las isothermas de Langmuir a la que se adecúa la primera forma de retención y la de Freundlich a la que se adecúa la segunda forma de retención o multimolecular de modo que suelos que se ajustan mejor a una u otra isoterma presentan una u otra forma de retención. Las ecuaciones son:

Langmuir: $\frac{C}{x/m} = \frac{1}{kb} + \frac{C}{b}$

Donde:

x/m = mg de S retenido/100 g de suelo

C = concentración de la solución de equilibrio en moles/l

k = constante de energía de retención

$1/b$ = pendiente de la recta

$1/kb$ = intersección

k = pendiente/intersección

$$\text{Freundlich: } x/m = kC^{1/n}$$

Donde:

x/m = mg de S retenido/100 g de suelo

C = concentración de la solución de equilibrio, moles/l

k y n = constantes empíricas

3.3.1.2 El método descrito por Kamprath para la fijación de los fosfatos, citados por Waugh y Fitts (67) consiste en incubar 5 g de suelo seco al aire con 2 ml de solución de concentración conocida de S a temperatura de ambiente por varios días (en nuestro caso 45 días).

La extracción de sulfatos se hizo con fosfato de calcio en ácido acético $2N$, 500 ppm P, que fue uno de los mejores en la extracción de sulfato disponible entre los probados por Hoefl (42) y el dosaje fue el mismo que el usado en el caso anterior.

Las concentraciones de las soluciones probadas fueron:

0, 1000 y 2000 ppm S en solución o

0, 400 y 800 micro g de S/g de suelo

Para ambos métodos la fuente de S utilizada fue el sulfato de potasio, grado reactivo.

La forma de comparar el método de Chao y el de Kamprath fue mediante la correlación simple entre el S retenido a los mismos niveles ofrecidos por ambos métodos (400 y 800 micro g S/g de suelo). Los valores para el método de Chao se calcularon en base a las ecuaciones lineales de la retención de sulfatos (Cuadro 1 del Apéndice). Para indicar esa relación entre el S retenido por los dos métodos se computó la ecuación de regresión:

$$Y = a + bX_1$$

Donde:

Y = micro g de S retenido/g de suelo por el método de Chao al nivel de 400 u 800 micro de S/g de suelo

a y b = constantes

X = micro g de S retenido/g de suelo por el método de Kamprath al nivel de 400 u 800 micro g de S/g de suelo

3.3.2 Estudio de la relación fosfato-sulfato

Para el estudio de la relación fosfato-sulfato se escogieron 11 suelos que en la retención de sulfatos se comportaron de manera diferente en la cantidad de S retenido y la pendiente de las isotermas de retención.

Los niveles de sulfato (SO_4^{--}) y fosfato (H_2PO_4^-) empleados fueron:

0, 1, 2, 3 y 4 meq/100 g de suelo para ambos y la clave fue:

S₀ S₁ S₂ S₃ S₄ para el SO_4^{--}

P₀ P₁ P₂ P₃ P₄ para el H_2PO_4^-

El procedimiento seguido fue el descrito por Chao y colaboradores (25) para la adsorción de sulfatos y por Kamprath (45) en su estudio de efecto del pH y las concentraciones de sulfato y fosfato en la adsorción de

sulfatos. Este consiste agitar 5 g de suelo seco al aire con 25 ml de una solución de concentración conocida de sulfato y fosfato por una hora. Se deja en reposo toda la noche y luego se procede a otra hora de agitación.

En el sobrenadante se determinó sulfato por turbidimetría y el fosfato por calorimetría por el método sulfomolibdico en un espectrofotómetro Coleman Junior II a 660 mμ.

Las soluciones de fosfato y sulfato se prepararon en base a fosfato de potasio y sulfato de potasio.

El diseño experimental utilizado fue el Irrestricto al Azar en arreglo factorial de 5^2 con tres repeticiones, el modelo matemático para la evaluación fue:

$$Y_{ijk} = U + A_i + B_j + (AB)_{ij} + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = unidad de respuesta

U = media general

A_i = efecto del ion sulfato

= efecto del ion fosfato

$(AB)_{ij}$ = interacción sulfato x fosfato

E_{ijk} = componente aleatorio

El Análisis de Variancia para el análisis estadístico de cada suelo fue:

F. V.	G. L.
Sulfato	4
Fosfato	4
$SO_4^{=}$ x $H_2PO_4^-$	16
Error	50
Total	74

El ANDEVA para hacer la evaluación de los 11 suelos en conjunto fue:

F. V.	G. L.
Repetición	2
Suelos (S)	10
$\text{SO}_4^{=}$	4
H_2PO_4^-	4
$\text{S} \times \text{SO}_4^{=}$	40
$\text{S} \times \text{H}_2\text{PO}_4^-$	40
$\text{SO}_4^{=} \times \text{H}_2\text{PO}_4^-$	16
$\text{S} \times \text{SO}_4^{=} \times \text{H}_2\text{PO}_4^-$	160
Error	548
Total	824

Para evaluar mejor el efecto de la concentración de sulfato en su retención y la influencia del fosfato (H_2PO_4^-) a diferentes concentraciones en el mismo fenómeno se calculó la ecuación de regresión cuadrática. Igual se hizo para evaluar la retención del fosfato (H_2PO_4^-) a diferentes niveles de sulfato.

El modelo matemático empleado fue:

$$Y = a + b_1P + b_2S + b_3P^2 + b_4S^2 + b_5SP$$

Donde:

Y = meo de $\text{SO}_4^{=}$ o H_2PO_4^- retenido/100 g de suelo

b_1 y b_2 = coeficientes lineales de la retención del fosfato y sulfato

b_3 y b_4 = coeficientes cuadráticos de la retención de fosfato y sulfato

b_5 = coeficiente de la interacción sulfato y fosfato

3.3.3 Formas de azufre y su distribución en el perfil

Para el estudio de las formas de S y su distribución en el perfil del suelo se consideraron: el S-total, el S-orgánico y el S-disponible pensando que estas tres formas nos dan la información necesaria para un uso inmediato, sobre todo la última.

El S-total se determinó según el método propuesto por Chaudry (30) usando una digestión con ácido nítrico y nitrato de potasio, que fue modificado por Burbano (20) con una predigestión con mezcla de ácido nítrico y ácido perclórico (5:1). La extracción de los sulfatos se hizo con fosfato de calcio 500 ppm P en ácido acético 2N y la determinación según Hoeft (42).

El S-orgánico fue determinado por el método de Bardsley (3) que incluye un tratamiento previo de la muestra con ácido clorhídrico 1N, acetato de calcio 1N y como fundente el bicarbonato de sodio. La extracción y el dosaje del sulfato se hizo como en el caso anterior.

El S-disponible se determinó extrayendo con fosfato de calcio 500 ppm P en ácido acético 2N, relación suelo:extractante = 2:2.5 con agitación de 30 minutos y determinando el sulfato por turbidimetría con espectrofotómetro Coleman Junior II a 440 mu, al igual que en las anteriores.

Como en las muestras de los perfiles se determinaron el pH en agua y en KCl 1N y el porcentaje de materia orgánica, se buscó la relación entre estas variables y las diferentes formas de S mediante unas correlaciones simples.

4. RESULTADOS

4.1 Retención de sulfatos

El estudio de retención de sulfatos se hizo utilizando dos métodos, el de Chao y el de Kamprath, con el objeto de compararlos y ver si en ambos casos los suelos tienen comportamientos parecidos o similares.

4.1.1 Método de Chao

En el Cuadro 5 se presentan los resultados calculados en base al S ofrecido en μg de S/g de suelo y al retenido por el suelo.

Con el objeto de averiguar a qué modelo matemático se ajusta la retención de sulfatos en estos suelos se relacionaron los datos de S ofrecido con S retenido. Se usó el coeficiente de determinación (R^2) como base para la comparación; este coeficiente indica el porcentaje de la suma de cuadrados de la variable dependiente que se explica por la variación de la variable independiente.

Todos ellos se adecúan al modelo lineal (Cuadro 6) con R^2 de 0.77 a 0.98, pero en algunos casos se pueden lograr mejores ajustes con el modelo logarítmico (suelos 3, 15, 23, 29 y 30) o el cuadrático (suelos 2, 4, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26 y 27).

Viendo las cantidades de S retenido por los diferentes suelos (Cuadro 5) se nota que hay ciertas tendencias similares al equilibrarlos con la solución de 500 ppm S (2500 μg de S/g de suelo), esto nos sirvió como criterio para agruparlos y facilitar su estudio. La agrupación que se hizo fue:

Cuadro 5. Cantidades de S retenido a diferentes niveles de S ofrecido por 30 suelos en el estudio de retención de sulfatos con dos métodos.

Suelo No.	Azufre ofrecido, micro g/g de suelo							
	Método de Chao						Método de Kamprath	
	250	500	1000	1500	2000	2500	400	800
	----- micro g S retenido/g de suelo -----							
1	40	140	180	210	270	380	3.8	106.1
2	60	220	290	310	330	440	90.6	261.4
3	140	290	390	400	400	640	230.1	450.5
4	180	320	510	510	540	590	274.2	488.8
5	10	150	160	180	190	340	58.0	139.2
6	40	180	200	220	380	460	46.7	54.0
7	30	200	210	230	400	480	70.8	137.7
8	20	220	260	280	290	420	91.2	189.1
9	20	210	270	480	530	560	107.1	488.1
10	70	200	230	290	370	410	29.5	225.1
11	20	210	240	260	270	500	10.8	242.8
12	60	170	250	410	480	490	91.4	345.2
13	110	290	390	430	540	630	174.3	428.3
14	180	370	550	670	890	900	313.2	626.5
15	90	220	250	250	270	340	112.1	162.3
16	110	320	450	480	700	710	318.0	727.8
17	210	400	580	650	720	860	382.8	666.8
18	120	310	450	580	580	830	380.4	685.9
19	90	290	420	560	690	700	300.0	537.5
20	160	410	520	600	750	880	394.5	667.5
21	30	210	210	500	560	650	117.4	263.7
22	130	330	430	570	680	740	429.0	794.5
23	170	360	480	600	1300	1260	498.4	872.3
24	220	430	520	550	800	1260	458.1	894.6
25	20	140	200	360	390	470	41.2	452.6
26	10	180	210	290	550	690	131.2	337.6
27	100	360	410	470	660	950	326.9	611.1
28	60	180	220	370	490	620	73.2	341.5
29	30	100	120	500	530	590	72.6	351.1
30	180	360	550	620	910	930	380.6	551.9

Cuadro 6. Coeficientes de determinación (R^2) de la retención de sulfatos ajustados a tres modelos matemáticos de los 30 suelos de Costa Rica.

Suelo No.	Lineal	Logaritmico	Cuadrático
1	0.926	0.892	0.927
2	0.840	0.843	0.871
3	0.830	0.882	0.830
4	0.792	0.915	0.934
5	0.785	0.740	0.788
6	0.916	0.873	0.920
7	0.897	0.832	0.899
8	0.772	0.737	0.795
9	0.905	0.847	0.964
10	0.933	0.914	0.949
11	0.785	0.760	0.788
12	0.936	0.961	0.983
13	0.931	0.925	0.950
14	0.948	0.976	0.982
15	0.760	0.812	0.791
16	0.912	0.919	0.942
17	0.930	0.963	0.963
18	0.929	0.942	0.936
19	0.923	0.930	0.983
20	0.941	0.930	0.953
21	0.033	0.889	0.942
22	0.945	0.948	0.979
23	0.901	0.937	0.904
24	0.886	0.899	0.943
25	0.954	0.901	0.975
26	0.944	0.851	0.958
27	0.916	0.891	0.928
28	0.983	0.962	0.985
29	0.896	0.934	0.904
30	0.952	0.976	0.967

Lineal: $Y = a + bX$

Logarítmico: $\log Y = \log b_0 + b_1 \log X$

Cuadrático: $Y = a + b_1 X + b_2 X^2$

Grupo No.	Suelos	S-retenido a 500 ppm S en la solución (2500 ug S/g de suelo)
1	1, 5, 6	300-400 ug S/g de suelo
2	2, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 25	400-500 ug S/g de suelo
3	3, 4, 9, 13, 19, 21, 26, 28 29	500-700 ug S/g de suelo
4	16, 22	700-800 ug S/g de suelo
5	14, 17, 18, 20, 27, 30	800-1000 ug S/g de suelo
6	23, 24	1200-1300 ug S/g de suelo

De los grupos los dos primeros se ajustan al modelo lineal con coeficientes de determinación de 0.75 y 0.85 y los cuatro restantes se ajustan al modelo cuadrático con R^2 que varía de 0.84 a 0.96.

Pero como en todos los casos los coeficientes del modelo lineal son buenos a todos los grupos los ajustamos a dicho modelo y se representan en la Figura 2 donde se ve que los grupos se diferencian por la cantidad de azufre retenido al nivel de 500 ppm S en la solución y por la pendiente de la ecuación, no así por el intercepto. El grupo de suelos con mayor pendiente es el 6 (suelos 23 y 24) lo que nos indica que estos suelos son los que retienen más azufre mientras que el grupo con menor pendiente es el 1 (suelos 1, 5 y 15).

En el Cuadro 7 se presentan los coeficientes de determinación de los 30 suelos al calcularse las isotermas de Langmuir y de Freundlich. En el podemos ver que nueve suelos se ajustan a la isoterma de Langmuir con R^2 que varía de 0.84 a 0.99 y los 21 restantes se ajustan bien a la isoterma de Freundlich con coeficientes de determinación que varía de 0.61 a 0.95.

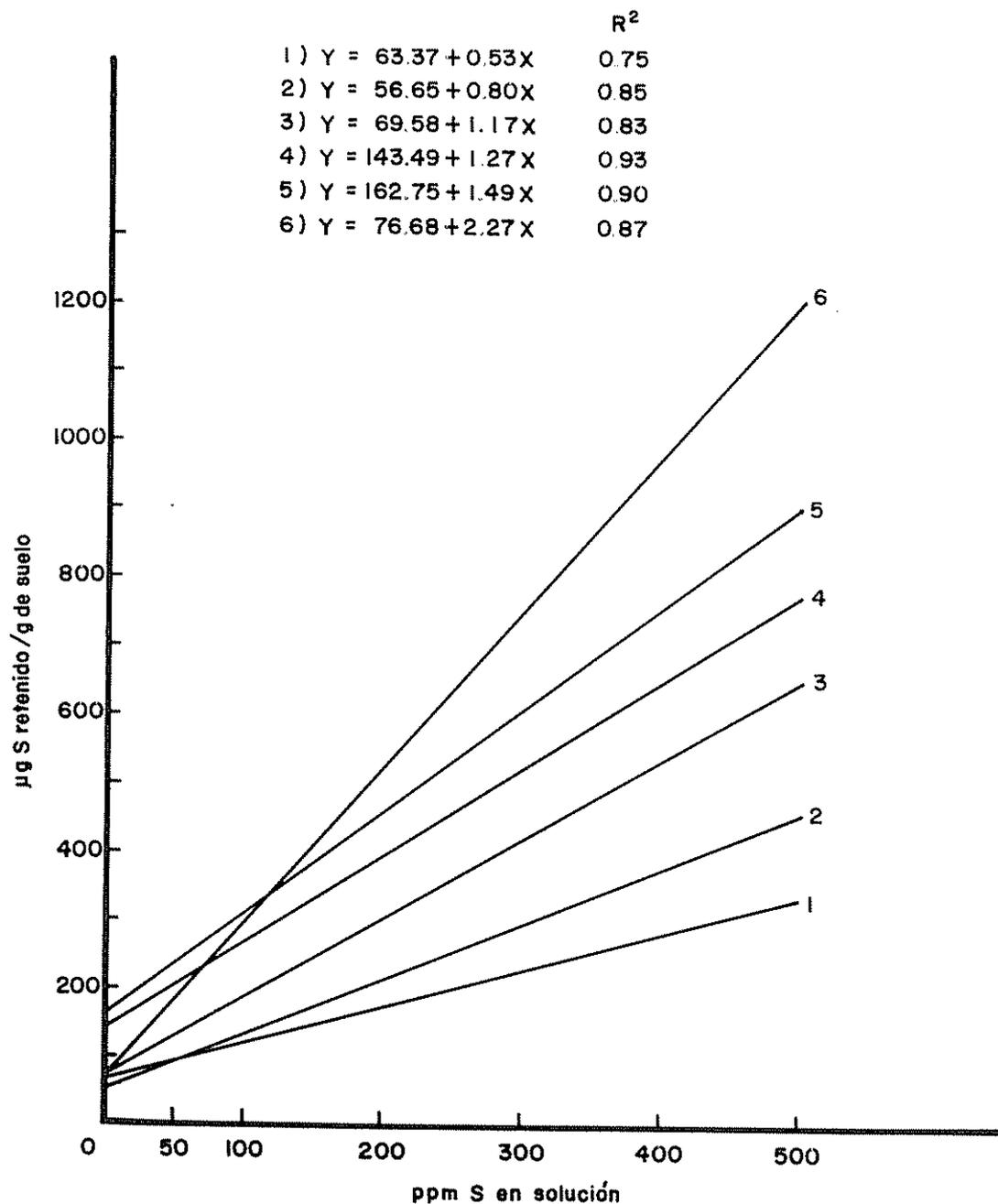


Fig. 2 - Retención de SO_4 en suelos agrupados en base a las cantidades retenidas al nivel de 500 ppm (2500 $\mu\text{g S/g}$ de suelo)

Cuadro 7. Coeficientes de determinación (R^2) de las isotermas de Langmuir y de Freundlich de los 30 suelos de Costa Rica.

Suelo No.	Langmuir	Freundlich
1	0.383	0.845
2	0.721	0.760
3	0.843	0.829
4	0.994	0.902
5	0.104	0.641
6	0.080	0.796
7	0.001	0.725
8	0.010	0.571
9	0.149	0.726
10	0.877	0.875
11	0.029	0.605
12	0.465	0.939
13	0.913	0.857
14	0.968	0.951
15	0.941	0.751
16	0.807	0.831
17	0.975	0.948
18	0.828	0.879
19	0.672	0.851
20	0.922	0.812
21	0.151	0.784
22	0.951	0.905
23	0.301	0.864
24	0.644	0.828
25	0.172	0.847
26	0.309	0.763
27	0.432	0.718
28	0.110	0.936
29	0.342	0.885
30	0.918	0.952

En el Cuadro 8 se consignan los interceptos ($1/kb$) y las pendientes ($1/b$) de las isothermas de Langmuir dadas por las ecuaciones, en base a los cuales se calculó la constante de retención (k) y la retención máxima (b) y se ve que la constante de energía de retención varía de 0.013 a 0.085×10^4 y la adsorción máxima de 37.0 a 111,1 mg S x 100 g de suelo.

Las pendientes de las ecuaciones varían de 0.010 a 0.027 correspondiendo la mayor al suelo con menor adsorción máxima, suelo 15 (Figura 3).

Cuadro 8. La retención máxima (b) de sulfatos y la constante de energía de retención (k) en los nueve suelos que se ajustan a la isoterma de Langmuir.

Suelo No.	$1/kb \times 10^4$	$1/b$	$k \times 10^{-4}$	b mg S/100 g de suelo	Coef. de Determ. (R^2)
3	0.406	0.016	0.039	62.5	0.843
4	0.189	0.016	0.085	62.5	0.994
10	1.187	0.016	0.013	62.5	0.877
13	0.561	0.012	0.021	83.3	0.913
14	0.247	0.009	0.036	111.1	0.968
15	0.717	0.027	0.038	37.0	0.941
17	0.168	0.011	0.065	90.9	0.975
20	0.296	0.010	0.034	100.0	0.922
22	0.460	0.010	0.022	100.0	0.951

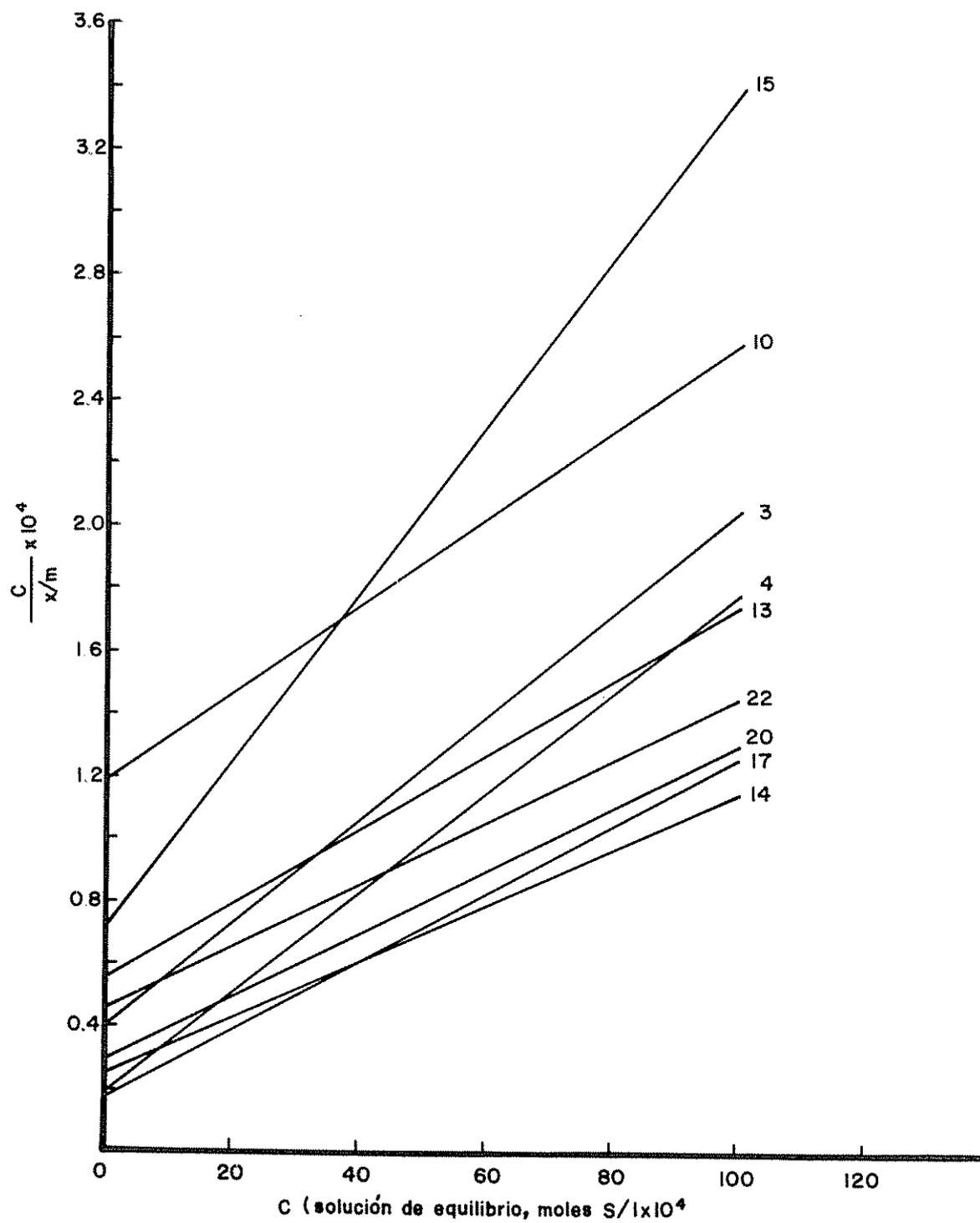


Fig. 3 - Isothermas de retención de azufre de Langmuir de nueve suelos de Costa Rica

De los nueve suelos que se ajustaron mejor a la isoterma de Langmuir se ve que dos mostraron tendencia logarítmica y 7 cuadrática al calcular las isotermas de retención de sulfatos. Esto ya puede dar una idea de que en esos suelos se estuvo cerca de la saturación de su capacidad de retener sulfatos.

En el Cuadro 9 se presentan las ecuaciones de Freundlich obtenidas para los 21 suelos que no se ajustaron a la ecuación de Langmuir. En el se puede ver que hay suelos que presentan valores parecidos en la pendiente de la recta, lo que permite hacer la siguiente agrupación, de menor a mayor pendiente:

<u>Grupo</u>	<u>Suelo No.</u>
1	24 y 30
2	16, 18, 27 y 2
3	23, 19, y 1
4	6 y 12
5	28, 8, 7 y 11
6	5 y 21
7	9 y 25
8	26 y 29

Las isotermas de Freundlich calculadas para los grupos de suelos se presentan en la Figura 4.

De manera general se ve que los grupos varían en la pendiente, criterio de nuestra agrupación, y como consecuencia en la intersección.

4.4.2 Método de Kamprath

En el Cuadro 5 se presentaron los resultados sobre retención de sulfatos obtenidos con este método.

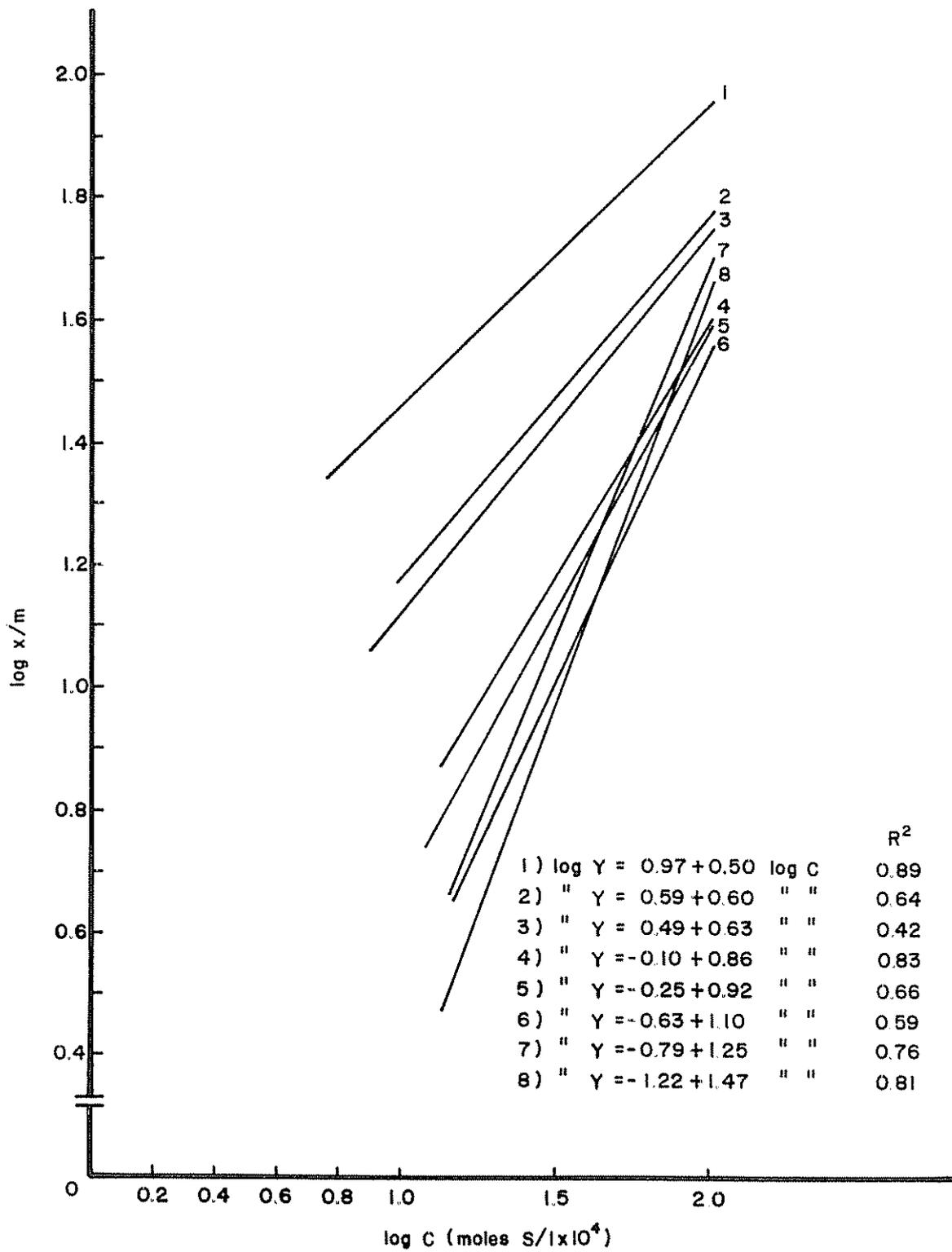


Fig. 4 - Isothermas de retención de azufre de Freundlich para suelos agrupados.

Cuadro 9. Ecuaciones y coeficientes de determinación (R^2) de las isoterms de Freundlich calculadas para 21 suelos.

Suelo No.	Ecuaciones	R^2
24	$\log x/m = 1.034 + 0.458 \log C$	0.83
30	$\log x/m = 0.905 + 0.536 \log C$	0.95
16	$\log x/m = 0.601 + 0.622 \log C$	0.83
18	$\log x/m = 0.632 + 0.623 \log C$	0.88
27	$\log x/m = 0.605 + 0.634 \log C$	0.72
2	$\log x/m = 0.305 + 0.638 \log C$	0.76
23	$\log x/m = 0.599 + 0.734 \log C$	0.86
19	$\log x/m = 0.376 + 0.747 \log C$	0.85
1	$\log x/m = -0.121 + 0.784 \log C$	0.85
6	$\log x/m = -0.147 + 0.846 \log C$	0.80
12	$\log x/m = -0.071 + 0.876 \log C$	0.94
28	$\log x/m = -0.111 + 0.904 \log C$	0.94
8	$\log x/m = -0.266 + 0.908 \log C$	0.57
7	$\log x/m = -0.264 + 0.919 \log C$	0.73
11	$\log x/m = -0.366 + 0.959 \log C$	0.61
5	$\log x/m = -0.836 + 1.107 \log C$	0.64
21	$\log x/m = -0.579 + 1.186 \log C$	0.78
9	$\log x/m = -0.728 + 1.255 \log C$	0.73
25	$\log x/m = -0.897 + 1.265 \log C$	0.85
29	$\log x/m = -1.067 + 1.390 \log C$	0.89
26	$\log x/m = -1.365 + 1.550 \log C$	0.76

Los suelos que al nivel de 800 micro g S/g de suelo tuvieron retenciones parecidas de S fueron agrupados para facilitar las interpretaciones y los cálculos; la agrupación resultante fue:

Grupo No.	Suelos	S retenido al ofrecer 800 micro g S/g
1	6	0 - 100 micro g S/g
2	1, 5, 7, 8 y 15	100 - 200 micro g S/g
3	2, 10, 11 y 21	200 - 300 micro g S/g
4	12, 26, 28 y 29	300 - 400 micro g S/g
5	3, 4, 9, 13. y 25	400 - 500 micro g S/g
6	19 y 30	500 - 600 micro g S/g
7	14, 17, 18, 20 y 27	600 - 700 micro g S/g
8	16 y 22	700 - 800 micro g S/g
9	23 y 24	800 - 900 micro g S/g

En las Figuras 5 y 6 se representa las relaciones entre las cantidades de S retenido, en micro g/g de suelo, por el método de Chao, calculado en base a las ecuaciones lineales de retención (Cuadro 1 del Apéndice), y el de Kamprath para los niveles ofrecidos de 400 y 800 micro g S/g de suelo.

Las ecuaciones de regresión lineal calculadas entre ambos métodos para 400 y 800 micro g de S ofrecido/g de suelo fueron:

$$Y_{400} = 311.72 + 1.19 (X) \quad R^2 = 0.83$$

$$Y_{800} = 407.00 + 1.38 (X) \quad R^2 = 0.74$$

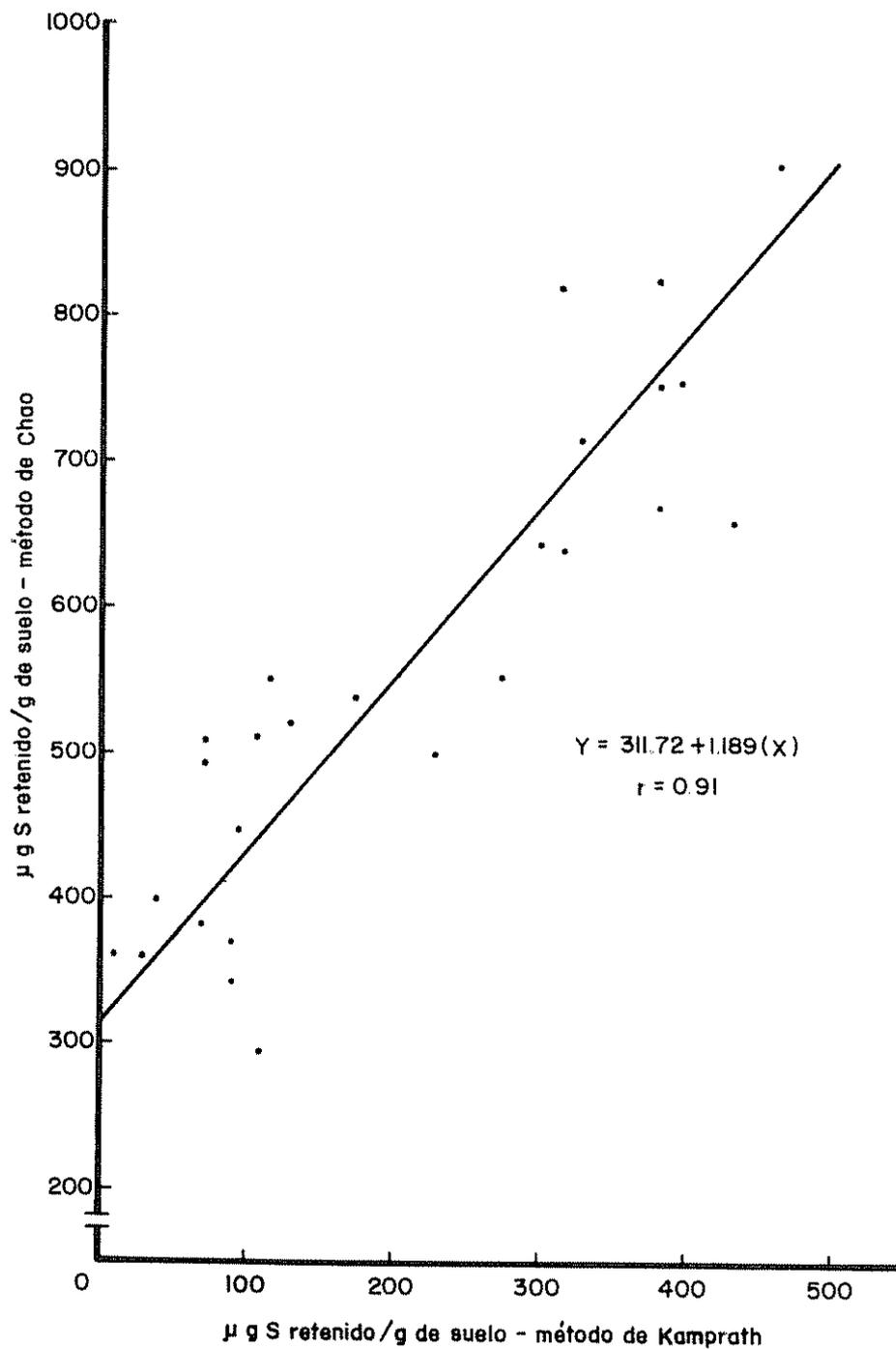


Fig. 5 - Relación entre el S retenido por el método de Chao y de Kamprath al ofrecer 400 μ g S/g de suelo.

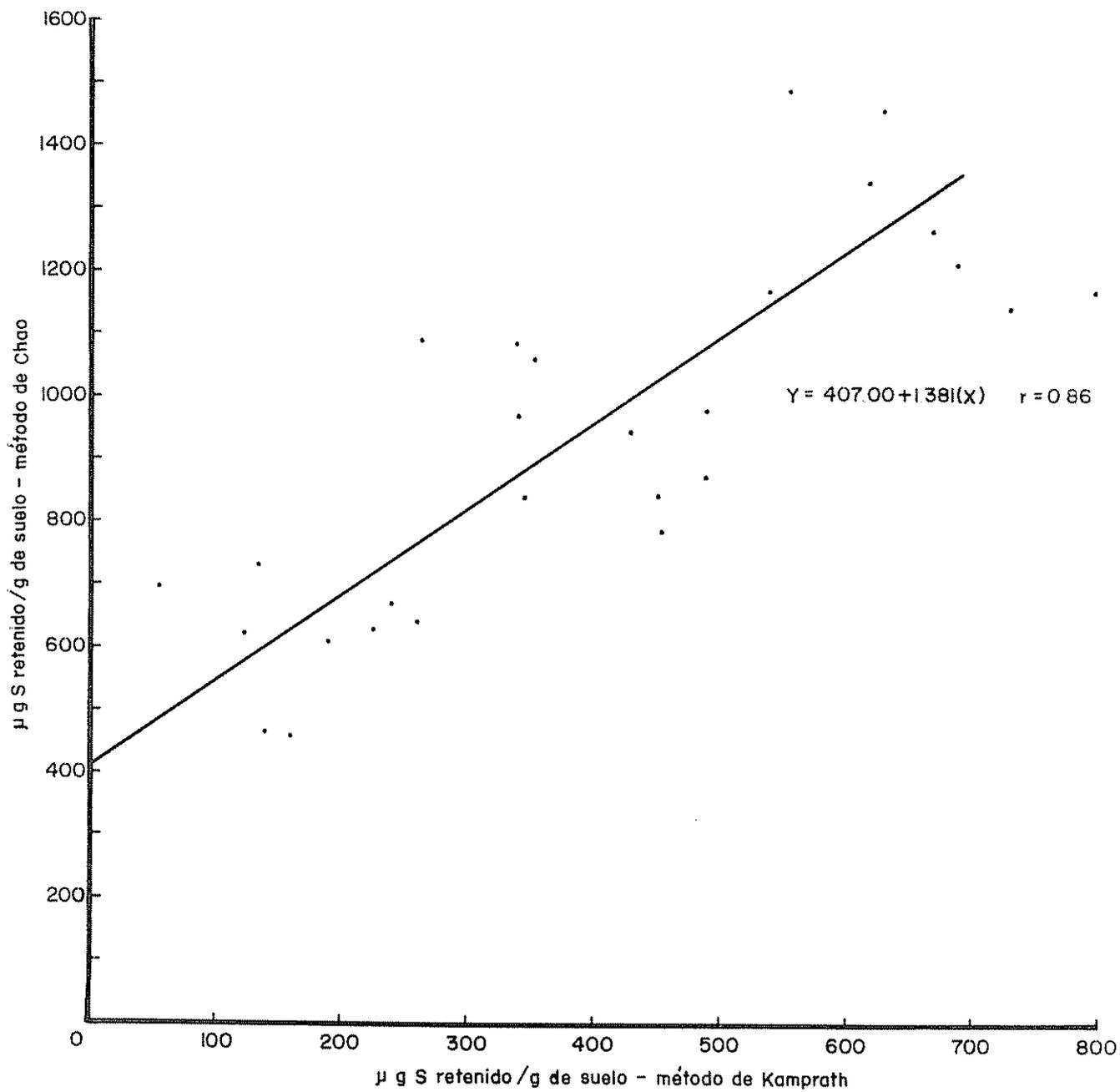


Fig. 6 - Relaci\u00f3n entre el S retenido por el m\u00e9todo de Chao y de Kamprath al ofrecer 800 $\mu\text{g S/g}$ de suelo

Donde:

Y_{400} e Y_{800} = micro g S retenido/g de suelo con el método de Chao

X = micro g de S retenido/g de suelo con el método de Kamprath para los mismos niveles (400 y 800 micro g ofrecido/g de suelo)

4.2 Estudio de la relación fosfato-sulfato

Con el objeto de ver el efecto del ion fosfato en la retención del sulfato y viceversa, se hizo un estudio de la relación fosfato-sulfato con 11 suelos de Costa Rica que en el experimento de retención se comportaron un tanto diferente. Los niveles probados y la metodología empleada se ha descrito en el capítulo de Materiales y Métodos.

En los Cuadros 10 y 11 se presentan los promedios, de tres repeticiones, de las cantidades de sulfato y fosfato ($H_2PO_4^-$) respectivamente, retenidos por los suelos considerados en esta prueba. En los Cuadros 2 y 3 del Apéndice se encuentran los respectivos análisis de variancia para cada suelo y para los 11 en conjunto, según se trate del sulfato o del fosfato.

La mayor cantidad de sulfato retenido, en promedio fue de 0.56 meq/100 g de suelo y correspondió al suelo No. 14 (Colonia Blanca) y la menor fue de 0.23 meq/100 g de suelo correspondiendo al suelo No. 26 (Batáan).

La cantidad de fosfato retenido, en promedio, varió entre 1.94 y 1.39 meq/100 g de suelo correspondiendo el mayor al suelo No. 4 (Buenos Aires) y el menor al suelo No. 10 (Bagaces). Como se puede ver no se encontró que el suelo tuvo el mismo comportamiento con ambos aniones.

En todos los casos la cantidad de fosfato retenido, en promedio, fue mayor que la del sulfato; las relaciones de fosfato retenido al ofrecer 1 y

Cuadro 10. Cantidad de sulfato retenido, en promedio, a diferentes niveles de fosfato ($H_2PO_4^-$) y sulfato por los 11 suelos del estudio de la relación fosfato - sulfato.

Tratamiento	Suelo No.										
	4	5	10	14	15	17	19	21	23	26	27
	----- meq $SO_4^{2-}/100$ g de suelo -----										
S ₀ P ₀	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P ₁	-0.011	0.083	0.069	-0.024	0.108	-0.022	0.050	0.013	-0.069	0.022	-0.034
P ₂	0.045	0.265	0.154	-0.055	0.236	0.033	0.171	0.042	-0.161	0.041	0.009
P ₃	-0.105	0.146	0.032	-0.194	0.219	0.098	0.132	0.025	-0.203	0.016	-0.002
P ₄	-0.250	-0.047	-0.005	-0.528	0.122	-0.210	-0.171	-0.082	-0.387	-0.008	-0.068
S ₁ P ₀	0.679	0.537	0.405	0.774	0.486	0.435	0.566	0.366	0.523	0.385	0.367
P ₁	0.598	0.521	0.339	0.511	0.319	0.353	0.421	0.264	0.549	0.346	0.207
P ₂	0.398	0.140	0.282	0.339	0.251	0.266	0.279	0.116	0.331	0.281	0.235
P ₃	0.161	0.091	0.218	0.124	0.234	0.141	0.154	0.123	0.275	0.158	0.275
P ₄	0.017	0.123	-0.121	0.052	0.107	0.106	0.124	-0.019	0.099	0.138	0.113
S ₂ P ₀	0.979	0.669	0.627	1.207	0.736	0.974	0.515	0.614	0.823	0.547	0.828
P ₁	1.041	0.449	0.617	1.048	0.651	0.906	0.513	0.539	0.744	0.321	0.666
P ₂	0.375	0.241	0.283	0.280	0.245	0.528	0.440	0.237	0.436	0.146	0.465
P ₃	0.308	0.236	0.224	0.364	0.230	0.115	0.096	0.188	0.293	0.076	0.102
P ₄	0.095	-0.143	0.030	0.216	0.220	0.165	-0.026	0.088	0.136	-0.154	0.059
S ₃ P ₀	1.434	0.639	0.855	1.648	0.893	1.240	0.853	0.954	1.523	0.542	1.093
P ₁	1.131	0.344	0.469	1.277	0.714	1.240	0.564	0.903	0.862	0.500	0.984
P ₂	0.483	0.271	0.160	0.624	0.642	0.770	0.522	0.342	0.496	0.285	0.379
P ₃	0.155	0.165	0.095	0.534	0.310	0.646	0.235	0.146	0.303	0.281	0.492
P ₄	0.121	-0.039	-0.024	0.442	0.165	-0.452	0.144	-0.079	0.059	-0.158	0.453
S ₄ P ₀	2.012	1.079	0.940	2.148	1.252	1.571	1.188	1.069	1.279	1.367	1.510
P ₁	1.469	0.464	0.499	1.671	0.926	1.488	1.389	0.993	0.886	0.489	1.536
P ₂	0.686	0.194	0.283	1.014	0.513	1.076	0.670	0.164	0.567	0.297	1.344
P ₃	0.620	0.378	0.193	0.816	0.199	0.999	0.102	0.126	0.339	0.051	0.699
P ₄	-0.312	-0.159	-0.091	-0.338	0.075	0.438	-0.197	-0.110	-0.396	-0.135	0.209

Cuadro 11. Cantidad de fosfato ($H_2PO_4^-$) retenido, en promedio, a diferentes niveles de fosfato y sulfato por los 11 suelos del estudio de la relación fosfato-sulfato.

Tratamiento	Suelo No.										
	4	5	10	14	15	17	19	21	23	26	27
	meq $H_2PO_4^-$ /100 g de suelo										
S ₀ P ₀	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P ₁	0.979	0.911	0.882	0.968	0.940	0.905	0.919	0.901	0.791	0.901	0.912
P ₂	1.945	1.652	1.562	1.903	1.728	1.793	1.836	1.743	1.588	1.542	1.765
P ₃	2.868	2.135	2.077	2.824	2.345	2.549	2.607	2.166	2.361	1.933	2.535
P ₄	3.863	2.688	2.474	3.775	3.017	3.393	3.541	2.730	3.158	2.329	3.306
S ₁ P ₀	0.017	0.004	-0.001	0.018	0.002	0.002	-0.001	0.001	-0.000	-0.002	0.000
P ₁	0.987	0.925	0.906	0.970	0.922	0.909	0.922	0.907	0.781	0.898	0.904
P ₂	1.950	1.590	1.594	1.913	1.783	1.806	1.839	1.707	1.586	1.610	1.797
P ₃	2.898	1.965	2.018	2.823	2.350	2.465	2.657	2.291	2.361	2.177	2.586
P ₄	3.784	2.530	2.205	3.729	3.870	3.274	3.496	2.783	3.136	2.362	3.348
S ₂ P ₀	0.019	0.006	-0.010	0.016	0.005	-0.008	0.000	0.006	0.003	0.007	0.002
P ₁	0.988	0.940	0.963	0.972	0.958	0.907	0.925	0.908	0.795	0.923	0.895
P ₂	1.953	1.609	1.602	1.922	1.786	1.731	1.842	1.723	1.585	1.573	1.794
P ₃	2.917	2.222	2.180	2.841	2.607	2.571	2.707	2.311	2.378	2.054	2.582
P ₄	3.834	2.644	2.229	3.760	2.935	3.236	3.514	2.507	3.124	2.424	3.420
S ₃ P ₀	0.018	0.006	0.003	0.021	0.005	0.003	0.001	-0.004	0.003	0.006	0.002
P ₁	0.987	0.914	0.881	0.961	0.915	0.907	0.919	0.935	0.729	0.922	0.891
P ₂	1.954	1.606	1.558	1.920	1.876	1.690	1.840	1.762	1.588	1.579	1.803
P ₃	2.923	2.173	2.043	2.864	2.405	2.605	2.717	2.430	2.378	2.080	2.646
P ₄	3.792	2.589	2.179	3.763	2.904	3.266	3.526	2.546	3.130	2.515	3.440
S ₄ P ₀	0.019	0.006	0.003	0.021	0.005	0.003	0.001	0.005	0.003	0.007	0.002
P ₁	0.988	0.932	0.884	0.971	0.937	0.915	0.925	0.936	0.797	0.926	0.915
P ₂	1.955	1.669	1.600	1.918	1.790	1.798	1.844	1.709	1.587	1.630	1.807
P ₃	2.916	2.198	2.163	2.844	2.410	2.417	2.713	2.287	2.370	2.064	2.551
P ₄	3.834	3.167	2.813	3.770	3.393	3.371	3.615	2.810	3.121	2.877	3.469

4 meq/100 g de suelo varían entre 3.4 a 6.0 veces.

Considerando la retención de sulfato, en promedio, se ve que los suelos se comportaron de manera diferente, la mayor cantidad retenida es 2.4 veces más que la menor mientras que en el caso del fosfato es solamente 1.4 veces más.

Comparando las cantidades de sulfato retenido de cada suelo sin influencia del fosfato, al pasar de 1.0 a 4.0 meq/100 g de suelo las relaciones varían de 2.0 (suelo No. 5) a 4.1 (suelo No. 27), lo que indica que los suelos se comportan de manera diferente en la retención, notando que el No. 5 sólo duplica el No. 27 cuadruplica la cantidad retenida de sulfato al variar la cantidad ofrecida.

La retención de fosfato también fue diferente para cada suelo, al subir la cantidad de fosfato ofrecido de 1.0 a 4.0 meq/100 g de suelo en ausencia de sulfato, los suelos subieron en 2.6 y 4.0 veces correspondiendo a las muestras No. 26 y 23 respectivamente.

En los análisis de variancia calculados para evaluar la retención de los sulfatos y el efecto de los fosfatos en dicha retención, además de la interacción entre ambos aniones, se obtuvieron resultados altamente significativos, lo que indica que la cantidad de sulfato y la concentración del fosfato influyen en la retención del primero.

En el análisis de variancia de la retención de fosfato y la influencia del sulfato, además de la interacción entre ambos iones, se obtuvo que la concentración del fosfato en todos los casos fue altamente significativo; la influencia del sulfato fue altamente significativa a excepción de los suelos 17 y 21 donde no fue significativa y de los suelos 14 y 19 donde sólo se logró significación al nivel de 0.05. Todas las interacciones fueron altamente

significativas a excepción de la muestra 21 donde sólo se logró significación. Sin embargo, la suma de cuadrados del fosfato fue mucho más grande que la del sulfato, lo que indica que su efecto en la retención del mismo es mayor que el del sulfato.

En el análisis de variancia para sulfato y fosfato considerando los 11 suelos dió diferencias altamente significativas para los efectos simples y las interacciones de primer y segundo orden.

4.3 Formas de azufre y su distribución en el perfil

En el Cuadro 12 se presentan los resultados del fraccionamiento del azufre en los 30 perfiles estudiados.

Se observa que existe una gran variabilidad entre los suelos y dentro de un mismo perfil.

El contenido de S-total en los 30 perfiles estudiados varía de 218 a 3928 ppm, observándose que a partir de 60-80 cm de profundidad el contenido mínimo es mayor que en los horizontes superiores y el contenido máximo es menor, lo que puede indicar que el alto contenido en las tres primeras profundidades se debe al aporte de la materia orgánica.

El contenido de S-orgánico varía de 40 a 1338 ppm, correspondiendo a la última y primera profundidad respectivamente. Los contenidos menores bajan con la profundidad y los más altos también bajan hasta la profundidad de 40-60 cm, luego permanecen prácticamente igual, esto corrobora en parte lo afirmado para el S-total.

El contenido de S-disponible en los 39 perfiles varía de 0 a 30 ppm valores encontrados de 60-80 cm y 80-100 cm de profundidad respectivamente. Los valores bajos son casi iguales mientras que los más altos bajan

Cuadro 12. Acidez, materia orgánica y formas de S en los perfiles de 30 suelos de Costa Rica.

Prof. cm	pH agua	pH KCl	M.O. %	S-total ppm	S-organ. ppm	S-dispon. ppm
<u>Suelo No. 1</u>						
0-20	4.7	3.7	1.1	506	112	18.1
20-40	6.0	4.0	1.7	862	216	3.5
40-60	6.0	4.1	1.1	520	162	6.0
60-80	6.4	4.2	1.3	1359	94	4.2
80-100	6.4	4.1	0.07	1566	43	4.1
<u>Suelo No. 2</u>						
0-20	5.7	4.9	5.4	747	234	11.6
20-40	6.5	4.6	1.8	1239	220	1.4
40-60	6.8	4.4	1.1	937	115	4.1
60-80	6.5	4.2	1.0	1595	82	2.0
80-100	6.5	4.5	0.9	1638	62	3.9
<u>Suelo No. 3</u>						
0-20	5.0	4.1	9.2	541	210	12.7
20-40	5.1	4.4	4.8	346	272	2.8
40-60	5.9	4.4	3.9	1017	253	9.6
60-80	5.5	5.0	2.1	1669	217	2.5
80-100	7.0	5.3	0.0	1908	134	6.6
<u>Suelo No. 4</u>						
0-20	5.4	4.2	9.5	750	394	9.7
20-40	5.4	4.4	4.6	1552	350	3.2
40-60	5.9	5.4	1.74	440	225	9.6
60-80	6.0	5.8	1.5	2016	294	6.0
80-100	6.3	5.4	1.1	1245	214	18.6
<u>Suelo No. 5</u>						
0-20	5.4	4.2	2.9	566	185	13.8
20-40	6.5	4.3	1.2	306	194	2.9
40-60	6.5	4.2	1.1	1540	181	8.3
60-80	6.5	4.3	0.9	1728	81	3.2
80-100	6.5	4.4	0.4	1669	45	5.3
<u>Suelo No. 6</u>						
0-20	5.7	4.7	1.4	937	210	8.8
20-40	6.8	4.9	0.8	294	208	2.4
40-60	6.8	4.9	0.5	467	181	6.9
60-80	6.8	4.9	0.5	840	141	3.9
80-100	6.8	4.7	0.4	1222	70	1.3

Cuadro 12 (Continuación)

Prof. cm	pH agua	pH KCl	M.O. %	S-total ppm	S-organ. ppm	S-dispon. ppm
<u>Suelo No. 7</u>						
0-20	5.8	4.9	2.2	558	191	13.3
20-40	6.3	5.1	1.5	459	212	2.1
40-60	6.6	5.3	1.7	457	173	10.5
60-80	6.6	5.5	1.4	1391	157	3.3
80-100	6.6	5.7	2.6	1493	110	2.6
<u>Suelo No. 8</u>						
0-20	5.9	4.8	3.3	312	161	8.5
20-40	6.4	5.0	1.0	351	140	2.4
40-60	6.9	5.4	0.2	236	68	9.2
60-80	6.7	5.8	0.1	1192	58	3.2
80-100	---	---	---	---	---	---
<u>Suelo No. 9</u>						
0-20	6.9	5.9	7.3	327	268	4.5
20-40	6.9	5.4	4.0	1337	395	2.1
40-60	6.7	5.7	0.8	945	409	9.2
60-80	6.8	5.3	0.9	1716	348	3.9
80-100	6.9	5.3	0.4	1638	202	7.8
<u>Suelo No. 10</u>						
0-20	6.2	5.2	7.7	500	271	12.4
20-40	6.6	5.1	2.3	1081	175	1.5
40-60	6.6	5.4	1.1	806	154	7.8
60-80	6.5	5.6	0.6	1147	91	2.4
80-100	6.7	5.3	0.6	689	442	3.9
<u>Suelo No. 11</u>						
0-20	5.7	5.0	3.4	367	107	9.5
20-40	6.7	5.4	2.4	371	143	2.9
40-60	6.8	5.5	1.7	383	152	11.8
60-80	6.9	6.1	0.9	1245	84	3.3
80-100	7.5	6.1	0.1	1669	42	9.3
<u>Suelo No. 12</u>						
0-20	5.6	5.0	3.7	535	272	10.0
20-40	7.1	5.7	1.7	672	288	3.8
40-60	7.1	5.7	0.9	775	208	9.4
60-80	7.0	5.9	0.6	1635	169	3.3
80-100	7.3	5.5	0.5	1066	54	13.0

Cuadro 12 (Continuación)

Prof. cm	pH agua	pH KCl	M.O. %	S-total ppm	S-organ. ppm	S-dispon. ppm
<u>Suelo No. 13</u>						
0-20	5.9	5.0	3.9	237	237	5.4
20-40	6.7	5.1	1.4	218	139	2.3
40-60	6.6	5.1	0.1	278	96	5.1
60-80	6.5	5.2	0.3	561	81	5.1
80-100	6.3	5.0	0.3	561	40	12.8
<u>Suelo No. 14</u>						
0-20	5.3	4.6	5.6	784	557	12.0
20-40	---	---	---	---	---	---
40-60	---	---	---	---	---	---
60-80	---	---	---	---	---	---
80-100	---	---	---	---	---	---
<u>Suelo No. 15</u>						
0-20	5.7	4.8	11.2	1252	837	10.9
20-40	6.7	5.2	5.1	1512	569	3.3
40-60	6.7	5.3	2.8	1498	408	12.3
60-80	6.7	5.7	1.5	883	239	8.0
80-100	6.9	6.1	1.3	1887	163	15.3
<u>Suelo No. 16</u>						
0-20	6.3	5.4	11.2	1474	840	14.5
20-40	6.6	5.5	4.8	2510	768	3.0
40-60	6.7	5.8	3.3	2593	762	12.5
60-80	6.8	5.0	0.6	989	91	5.5
80-100	6.4	5.3	0.9	2443	253	12.9
<u>Suelo No. 17</u>						
0-20	5.7	4.9	6.7	973	677	7.6
20-40	6.7	4.3	3.8	1456	565	3.1
40-60	5.9	4.3	1.4	922	529	2.8
60-80	5.8	4.2	1.3	1210	352	1.1
80-100	---	---	---	---	---	---
<u>Suelo No. 18</u>						
0-20	5.1	4.6	17.3	1756	1338	17.4
20-40	6.8	4.9	12.9	3480	1032	8.1
40-60	6.1	5.4	3.8	1399	892	25.4
60-80	6.0	5.4	5.5	1976	949	28.0
80-100	6.1	5.3	5.8	2670	966	30.0

Cuadro 12 (Continuación)

Prof. cm	pH agua	pH KCl	M.O. %	S-total ppm	S-organ. ppm	S-dispon. ppm
<u>Suelo No. 19</u>						
0-20	6.0	5.2	3.0	232	117	7.8
20-40	6.6	5.4	0.9	747	281	2.3
40-60	6.6	5.3	0.3	1951	285	8.6
60-80	6.4	5.2	0.4	1055	163	2.8
80-100	6.4	5.2	0.7	2242	147	1.5
<u>Suelo No. 20</u>						
0-20	4.8	4.4	4.5	375	137	15.0
20-40	6.9	4.9	1.3	1347	445	3.3
40-60	6.2	5.2	0.6	1335	460	6.8
60-80	6.1	4.9	0.7	1680	431	5.6
80-100	5.9	4.9	0.7	1784	436	25.9
<u>Suelo No. 21</u>						
0-20	5.8	4.8	5.9	361	277	14.4
20-40	5.6	4.9	5.4	1150	513	1.3
40-60	6.4	5.1	4.2	1236	672	8.7
60-80	6.4	5.1	3.3	1326	497	2.5
80-100	6.5	5.1	3.2	2002	520	16.9
<u>Suelo No. 22</u>						
0-20	5.4	4.8	17.4	3928	1095	12.0
20-40	5.1	4.8	13.5	1119	847	4.2
40-60	6.3	4.9	13.5	1714	916	14.9
60-80	6.2	5.0	12.7	1885	854	11.6
80-100	6.1	5.2	10.4	2677	809	8.9
<u>Suelo No. 23</u>						
0-20	5.0	4.3	18.9	1054	912	10.7
20-40	6.1	4.5	13.4	3327	672	3.1
40-60	5.5	5.4	10.1	1084	728	5.6
60-80	5.5	4.7	5.8	1831	546	8.3
80-100	5.6	4.6	3.4	2234	430	15.0
<u>Suelo No. 24</u>						
0-20	5.2	4.7	17.7	1693	1089	8.0
20-40	6.5	5.0	10.1	1077	782	2.8
40-60	6.2	5.2	8.9	1089	789	2.9
60-80	6.3	5.6	6.7	1491	731	8.8
80-100	6.4	4.9	1.3	1023	126	1.3

Cuadro 12 (Continuación)

Prof. cm	pH agua	pH KCl	M.O. %	S-total ppm	S-organ. ppm	S-dispon. ppm
<u>Suelo No. 25</u>						
0-20	5.7	5.1	2.3	638	275	3.9
20-40	6.8	5.0	0.5	270	118	2.7
40-60	6.7	4.9	0.9	270	167	2.7
60-80	6.5	5.7	1.7	1179	620	10.3
80-100	---	---	---	---	---	---
<u>Suelo No. 26</u>						
0-20	6.0	5.1	4.6	1395	261	3.8
20-40	6.4	5.2	2.2	267	214	2.4
40-60	6.8	4.9	1.1	1219	148	3.3
60-80	6.7	5.1	0.3	1026	135	1.1
80-100	6.8	4.9	0.7	1680	81	3.9
<u>Suelo No. 27</u>						
0-20	5.3	4.8	6.6	639	262	4.2
20-40	6.7	4.9	4.2	1265	594	2.5
40-60	6.6	5.2	6.8	1242	642	2.7
60-80	6.6	5.3	6.9	1350	518	2.6
80-100	6.4	5.0	2.4	2025	275	9.5
<u>Suelo No. 28</u>						
0-20	5.4	4.4	8.6	2017	340	2.7
20-40	6.6	4.8	2.9	299	204	2.2
40-60	6.7	4.8	2.1	113	162	3.4
60-80	6.7	4.5	0.4	1242	86	1.1
80-100	6.4	4.6	0.8	2650	83	1.3
<u>Suelo No. 29</u>						
0-20	5.2	4.6	6.9	2934	269	3.8
20-40	6.6	4.8	3.8	272	141	1.6
40-60	6.9	4.8	2.2	810	162	3.4
60-80	6.6	4.6	1.3	1431	81	4.5
80-100	6.3	4.8	0.9	2014	61	1.3
<u>Suelo No. 30</u>						
0-20	4.8	4.1	7.9	718	340	1.6
20-40	5.7	4.5	1.1	1155	440	2.5
40-60	5.7	4.3	1.2	1155	491	3.4
60-80	6.0	4.4	0.8	1237	412	0.0
80-100	5.7	4.2	0.3	1540	470	1.3

de 20-40 cm para luego subir en las demás hasta alcanzar valores mayores a los encontrados en muestras de 0-20 cm.

Diez suelos presentan su más alto contenido de S-disponible de 0-20 cm de profundidad, seis a la profundidad de 40-60 cm, tres de 60-80 y diez de 80-100. Esto indica que hay una zona del perfil donde el S-disponible baja probablemente por lavado y otras donde es retenido o adsorbido.

Con el objeto de determinar el grado de relación entre las diferentes variables obtenidas para cada muestra de cada perfil se calculó la correlación cuyos coeficientes se encuentran en el Cuadro 13.

En dicho cuadro se ve que hay correlación significativa ($P = 0.01$) entre S-total y porcentaje de materia orgánica hasta 40 cm de profundidad; entre S-total y S-orgánico hasta 60 cm de profundidad; entre S-orgánico y porcentaje de materia orgánica en todo el perfil (100 cm); entre S-total y S-disponible de 20-40 cm de profundidad y entre S-orgánico y S-disponible de 20-40 cm y 60-80 cm. En muestras de 0-20 cm también se encontró correlación significativa ($P = 0.01$) entre N-total, S-total y S-orgánico.

Igualmente hay correlación ($P = 0.05$) entre S-orgánico y S-disponible de 80-100 cm ; S-orgánico y pH en agua (negativo) de 40-60 cm y entre S-disponible y porcentaje de materia orgánica de 20-40 cm de profundidad.

Cuadro 13. Coeficiente de correlación entre las diferentes formas de S, materia orgánica y pH determinado en los 30 suelos de Costa Rica.

Variables correlacionadas	Profundidad, en cm				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
S-total x % M. O.	0.59**	0.68**	0.34	0.46	0.53
x N-total	0.64**	--	--	--	--
x S-orgánico	0.60**	0.79**	0.60**	0.48	0.44
x S-disponible	-0.08	0.56**	0.28	0.38	0.21
S-orgánico x % M. O.	0.88**	0.82**	0.75**	0.79**	0.76**
x N-total	0.82**	--	--	--	--
x S-disponible	0.22	0.61**	0.36	0.70**	0.56*
x pH agua	-0.15	-0.14	-0.52*	-0.46	-0.52
S-disponible x % M. O.	0.12	0.54*	0.15	0.50	0.32

** P 0.01

* P 0.05

5. DISCUSION

5.1 Retención de sulfato

Estudiando la retención de sulfatos con el método de Chao se obtuvo correlación significativa entre el S retenido por los suelos a diferentes concentraciones de S en las soluciones ($r = 0.70$ a 0.96), lo que nos indica que con todos los suelos hay una cierta uniformidad en el proceso de retención con este método. Al incrementar la concentración de S en la solución aumenta la cantidad de S retenido confirmando que es un fenómeno dependiente de la concentración (22, 24, 25), y por que el S retenido se encuentra en equilibrio cinético con el S en la solución (24).

El diferente comportamiento de los suelos en la retención de S puede deberse a las diferencias de sus propiedades químicas y de su composición mineralógica (45).

En el análisis de correlación entre la retención de sulfato por el suelo a la concentración de 500 ppm S en solución y algunas características químicas del suelo se encontró correlación altamente significativa con el porcentaje de materia orgánica ($r = 0.62$) y correlación significativa negativa con el Ca-cambiable ($r = -0.54$) y con la suma de cationes cambiables ($r = -0.54$), no así con el pH y la arcilla o arcilla + limo como encontraron Kamprath (45), Chao y colaboradores (25), Bornemisza y Llanos (14), respectivamente. La ausencia de correlación puede deberse a que los suelos estudiados tienen minerales de arcilla con propiedades diferentes (16), o que la forma de dispersión utilizada no fue efectiva.

En cambio la relación con la materia orgánica reafirma lo determinado por Chao y colaboradores (25) quienes al destruir esta fracción del

suelo hicieron que la capacidad de retención se reduzca de un tercio a la mitad.

Observando los datos analíticos de los suelos agrupados según su retención a 500 ppm S en la solución se ve que no hay tendencia clara entre grupos menos retentivos y más retentivos en el pH medido en agua. Del primero al cuarto grupo se nota que el promedio sube de 5,2 a 5,8 para luego bajar hasta 5,1, lo que explica la buena retención de los dos últimos grupos (25, 25, 28, 36 y 45). Para los grupos anteriores (1, 2, 3 y 4) los factores pueden ser varios y estar interrelacionados de tal manera que se encubran sus efectos.

El contenido de materia orgánica en promedio sube en el mismo sentido que se incrementa la retención de S a excepción de los grupos 1 y 4 donde posiblemente la materia orgánica es todavía poco activa debido a su grado de humificación, y el contenido de Ca y Mg-cambiable disminuye a medida que aumenta la capacidad de retención de los suelos.

Estas observaciones nos demuestran que además del pH existen otros factores como la materia orgánica que favorecen la retención de S en forma iónica y molecular a diferencia de los coloides minerales que retienen sólo formas iónicas de sulfato (25). Otros autores (14, 23, 25 y 38) confirman la importancia de la materia orgánica en la retención de sulfatos.

El efecto negativo del Ca y Mg-cambiable corrobora la correlación negativa encontrada con la suma de cationes porque estos son los que constituyen casi la totalidad de cationes cambiables presentes en el suelo; a mayor concentración de Ca y Mg el pH usualmente es más alto y en consecuencia menor la capacidad de retener S, en cambio a mayor materia orgánica el pH es generalmente más bajo y la capacidad de retención es mayor.

Probablemente una causa importante de la diferencia en la retención de sulfatos encontrada en los suelos individualmente y agrupados es el contenido de óxidos libres de hierro y aluminio. Estudios de Bornemisza e Igue (15) reportan mayores contenidos de ambos óxidos y con predominio del óxido de aluminio en suelos de la serie Colorado, Birrisito y Cervantes que en los suelos de La Lola y que en nuestro estudio se encuentran en los grupos 5, 4 y 2 respectivamente.

Las isotermas de retención de S en los 30 suelos se ajustan bien al modelo lineal, al logarítmico y al cuadrático con coeficientes de determinación altamente significativos ($R^2 = 0.80$ a 0.98) y puede deberse a que la tendencia logarítmica y cuadrática no sean notables alejándose poco de la lineal. El ajuste al modelo lineal indica que la retención es un fenómeno dependiente de la concentración (22, 24 y 45) y se está lejos de llegar a la saturación de la capacidad de retención que es lo que indica la tendencia cuadrática y en unos casos la logarítmica.

En más de los dos tercios de las muestras la retención de S se incrementa poco al pasar de 100 a 200 ppm S en la concentración de la solución, como consecuencia las isotermas se ajustan a la curva tipo II de Brunauer, coincidiendo con lo encontrado por Bornemisza y Llanos (14) en tres suelos de Costa Rica.

El hecho de que sobre 200 ppm S en solución los suelos retengan más puede deberse a la activación de nuevos sitios o mecanismos de retención de sulfatos (5, 37) y debe ser de varias capas o multimolecular que es a la que corresponde la curva tipo II de Brunauer (14).

Kamprath y colaboradores (45) encontraron que la retención de S de unos suelos de Carolina del Norte se ajusta a la ecuación de Langmuir,

mientras que Chao y colaboradores en suelos de Oregón (24) determinaron que cuando el suelo se equilibra con soluciones de concentraciones bajas de S (11-15 ppm) la retención se ajusta a la ecuación de Langmuir, pero al subir la concentración hasta 500 ppm S se ajusta a la ecuación de Freundlich; Bornemisza y Llanos en suelos de Costa Rica (14) ajustaron a dicha ecuación los resultados de su estudio.

Que un suelo se ajuste bien a la ecuación de Langmuir indica que tiende a saturar su capacidad de retención y es posible determinar la retención máxima, ya que la base teórica de la isoterma de Langmuir es la adsorción monomolecular de gases sobre superficies sólidas.

En cambio si un suelo se ajusta a la ecuación de Freundlich quiere decir que con las concentraciones utilizadas no se llega a la capacidad de saturación por haberse activado otros mecanismos de retención, por haber más de un sitio de retención a alguna otra causa (5, 37).

En este estudio nueve suelos se ajustan mejor a la ecuación de Langmuir, lo que indica que se ha llegado cerca a la saturación de la capacidad de retención; las isotermas de retención de S de estos suelos se ajustaban mejor al modelo cuadrático (7 suelos) y al logarítmico (2 suelos) y ambos modelos indican tendencia a la saturación.

De los nueve suelos en la prueba cualitativa para determinar alofana tres dieron reacción rápida, tres reacción media y en tres fue negativa. Que en seis de los nueve suelos hay indicaciones de la presencia de materiales amorfos puede sugerir que estos tienen capacidad limitada en la retención de sulfatos, en los tres restantes el pH alto (6.2 y 5.7 en dos de ellos) o materia orgánica baja (4.8%) confirma las condiciones explicadas antes donde los suelos retienen menos sulfatos.

Los suelos que se ajustan a la isoterma de Langmuir al parecer son los más viejos y los minerales de arcilla tienen capacidad definida de retención de sulfato que es muy baja, 740 kg S/ha para el suelo No. 15 (Escazú) y 2222 kg S/ha para el suelo No. 14 (Colonia Blanca).

Los 21 suelos restantes se ajustaron a la ecuación de Freundlich indicándonos la imposibilidad de calcular la retención máxima, Bornemisza y Llanos (14) obtuvieron los mismos resultados en tres suelos de Costa Rica, igualmente Chao y colaboradores (24) en suelos de Oregon.

De estos 21 suelos sólo en tres se encontró reacción rápida a la prueba de alofana y en tres reacción media, en los 15 restantes fue negativa. Esto puede indicar una vez más que los materiales amorfos tienen capacidad limitada de retención de sulfatos porque los suelos que dieron reacción rápida al alofano (suelos 18, 23 y 24) tienen los contenidos más altos de materia orgánica con quien se encontró correlación; en los otros tres las causas pueden ser otras.

La retención de sulfatos con el método de Kamprath en todos los casos es menor que con el de Chao, para los mismos niveles de S ofrecido, pero los coeficientes de correlación son altamente significativos ($r = 0.86$ a 0.91) y el hecho de que muchos de los suelos en ambos métodos se encontraron en los mismos grupos indica que los mecanismos de retención son los mismos.

5.2 Relación fosfato-sulfato

Se estudió la relación fosfato-sulfato usando 11 suelos escogidos en base a su comportamiento en la retención de sulfatos. Estos suelos fueron sometidos a cinco niveles de sulfato (SO_4^{--}) y cinco de fosfato (H_2PO_4^-) en un experimento factorial, midiendo al final la cantidad de sulfato y

fosfato retenido en cada caso.

En todos ellos se incrementó la retención de sulfato al aumentar la concentración de este en ausencia de fosfato. De los 11 suelos, las muestras No. 4 (Buenos Aires) y 14 (Colonia Blanca) fueron los que retuvieron más sulfato y los que menos retuvieron fueron la 10 (Bagaces) y la 5 (Buena Vista); los suelos que retuvieron más fosfato fueron los mismos (suelos 4 y 14) que en el caso del sulfato y los menos retentivos fueron la 10 (Bagaces) y la 25 (Batáan).

Esto indicaría que los mecanismos de retención de ambos aniones son parecidos (5) y su actividad coincide con el cambio del pH porque los más retentivos tienen valores bajos (5.4 y 5.3) y los menos retentivos tienen valores más altos (6.2 y 6.0) o menos materia orgánica como el suelo No. 5 (2.9%). La menor cantidad de sulfato retenida a niveles altos de fosfato se explica por la mayor fuerza de fijación de este anión con respecto al sulfato, fenómeno observado por Kamprath (45), Chao (24), Barrow (4) y Bornemisza y Llanos (14).

En el Cuadro 14 (a) y (b) se presentan los parámetros de las ecuaciones de regresión cuadrática para la retención de sulfatos (Y, ecuación (a)) y fosfato (Y, ecuación (b)) respectivamente; donde b_1 = efecto lineal del fosfato, b_2 = efecto lineal del sulfato, b_3 = efecto cuadrático del fosfato, b_4 = efecto cuadrático del sulfato y b_5 = interacción sulfato x fosfato.

Observando los coeficientes b_1 del Cuadro 14 (a), retención de sulfato, se ve que en ocho suelos es negativo variando de -0.032 (suelo No. 26) a -0.125 (suelo No. 14) y en los tres restantes es positivo y los valores van de 0.040 (suelo No. 27) a 0.135 (suelo No. 17).

Cuadro 14. Parámetros de las ecuaciones de regresión cuadráticas* calculadas para los 11 suelos en el estudio de la relación fosfato - sulfato, para la retención de SO_4^- (a) y H_2PO_4^- (b)

Suelo No.	Parámetros						R^2
	a	b1	b2	b3	b4	b5	
(a) Retención de SO_4^-							
4	0.068	-0.056	0.596	0.003	-0.035	-0.117	0.94
5	0.202	-0.050	0.217	0.003	-0.035	-0.053	0.78
10	0.119	-0.051	0.322	0.009	-0.033	-0.060	0.91
14	0.047	-0.124	0.712	0.010	-0.050	-0.105	0.93
15	0.102	-0.004	0.332	0.006	-0.014	-0.079	0.94
17	0.023	0.135	0.355	-0.048	0.019	-0.082	0.91
19	0.042	0.094	0.313	-0.026	-0.004	-0.082	0.87
21	0.021	-0.037	0.392	0.007	-0.028	-0.081	0.92
23	-0.026	-0.058	0.689	0.000	-0.088	-0.083	0.95
26	0.063	-0.032	0.258	0.010	-0.005	-0.078	0.84
27	-0.022	0.040	0.330	-0.009	0.022	-0.080	0.92
Retención de H_2PO_4^-							
4	0.003	0.989	0.004	-0.009	0.000	-0.001	0.99
5	0.110	0.864	-0.107	-0.061	0.022	0.023	0.99
10	0.071	0.968	-0.104	-0.101	0.023	0.015	0.98
14	0.010	0.962	0.002	-0.007	0.000	0.000	0.99
15	-0.012	0.938	0.037	-0.035	-0.007	-0.003	0.97
17	0.020	0.926	-0.028	-0.024	0.007	-0.003	0.99
19	0.008	0.930	-0.009	-0.015	0.002	0.006	0.99
21	-0.012	1.047	-0.012	-0.094	0.004	0.001	0.99
23	-0.003	0.802	-0.005	-0.004	0.001	-0.001	0.99
26	0.067	0.889	-0.036	-0.081	0.004	0.025	0.99
27	0.007	0.907	0.009	-0.020	-0.004	0.009	0.99

* $Y = a + b1P + b2S + b3P^2 + b5SP$

El coeficiente b_2 (efecto lineal del sulfato) en los 11 suelos es positivo variando de 0.217 (suelo No. 15) a 0.712 (suelo No. 14) indicándonos que el primero es el que retiene menos del sulfato añadido y el segundo el que retiene más. El efecto cuadrático del fosfato en la retención de sulfatos (b_3) es positivo en ocho suelos y negativo en tres, pero en todos los casos el valor es pequeño. En cambio el efecto cuadrático del sulfato (b_4) es negativo en nueve suelos presentando el valor más grande para el suelo No. 23 (-0.088), lo que indica que este es el que presenta la mayor tendencia cuadrática (Figura 9). En los dos suelos el coeficiente (b_4) es positivo e indica que a mayor cantidad de sulfato añadido mayor es la retención y con tendencia cuadrática.

En los once suelos el coeficiente b_5 es negativo y el mayor lo tiene el suelo No. 4 (-0.117). Los coeficientes de determinación (R^2) varían de 0.78 (suelo No. 5) a 0.95 (suelo No. 23).

Observando el Cuadro 14 (b) se ve que el coeficiente b_1 , efecto lineal del fosfato en la retención del mismo es positivo y varía de 0.802 (suelo No. 23) a 1.947 (suelo No. 21) indicando que los suelos retienen más fosfato que sulfato, ya que los valores son mayores que en el caso de sulfato (0.217 a 0.712); el efecto lineal del sulfato (b_2) en siete suelos es negativo y en cuatro suelos es positivo, pero en todos los casos los valores son pequeños.

El efecto cuadrático del fosfato (b_3) en los 11 suelos es negativo presentando mayor valor el suelo No. 10 (-0.101), lo que significa que este es el que presenta una mayor tendencia cuadrática (Figura 11), o que tiende a saturar su capacidad de retención de fosfatos.

Los coeficientes b_4 y b_5 son en la mayoría de los casos pequeños.

El coeficiente de determinación R^2 en la ecuación de regresión cuadrática de la retención de fosfatos varía de 0.97 (suelo No. 15) a 0.99 (suelos Nos. 4, 5, 14, 17, 19, 21, 23, 26 y 27). Estos coeficientes de determinación (R^2) altos indican que la ecuación cuadrática explica muy bien el fenómeno de retención de fosfatos.

Como los suelos tienen comportamiento diferente en la retención de sulfatos y fosfatos y se ve que presentan tendencias, se escogió cuatro de ellos para representarlos en figuras. En las Figuras 7, 8, 9 y 10 se representa la retención de sulfatos a diferentes niveles de fosfato ($H_2PO_4^-$) y sulfato respectivamente para los suelos No. 10 (Bagaces) de baja retención, suelo No. 4 (Buenos Aires) de retención alta, suelo No. 23 (Juan Viñas) con alto efecto cuadrático en la retención y el suelo No. 17 (La Argentina), también cuadrático pero con coeficiente (b_4) positivo.

Se ve que a mayor cantidad de fosfato menor es la retención de sulfatos y en todos los casos la tendencia es cuadrática siendo mayor en el suelo No. 23 (Juan Viñas) que tuvo el mayor coeficiente del sulfato (b_4 , -0.088) y el suelo No. 17 (La Argentina) que sale de lo normal encontrando la impresión de que su capacidad de retención aumenta a medida que crece el nivel del sulfato.

Las diferentes cantidades de sulfatos retenidas por los suelos No. 10 (Bagaces) y No. 4 (Buenos Aires) se puede explicar por la diferencia en el pH y en la suma de cationes; el suelo No. 10 de retención baja tiene el pH más alto, 6.2, y 14.2 meq/100 g de cationes cambiabiles, mientras que el No. 4 tiene pH 5.4 y 2.9 meq/100 g de cationes cambiabiles. Igualmente el suelo No. 4 parece tener mayor cantidad de alofana y un poco más

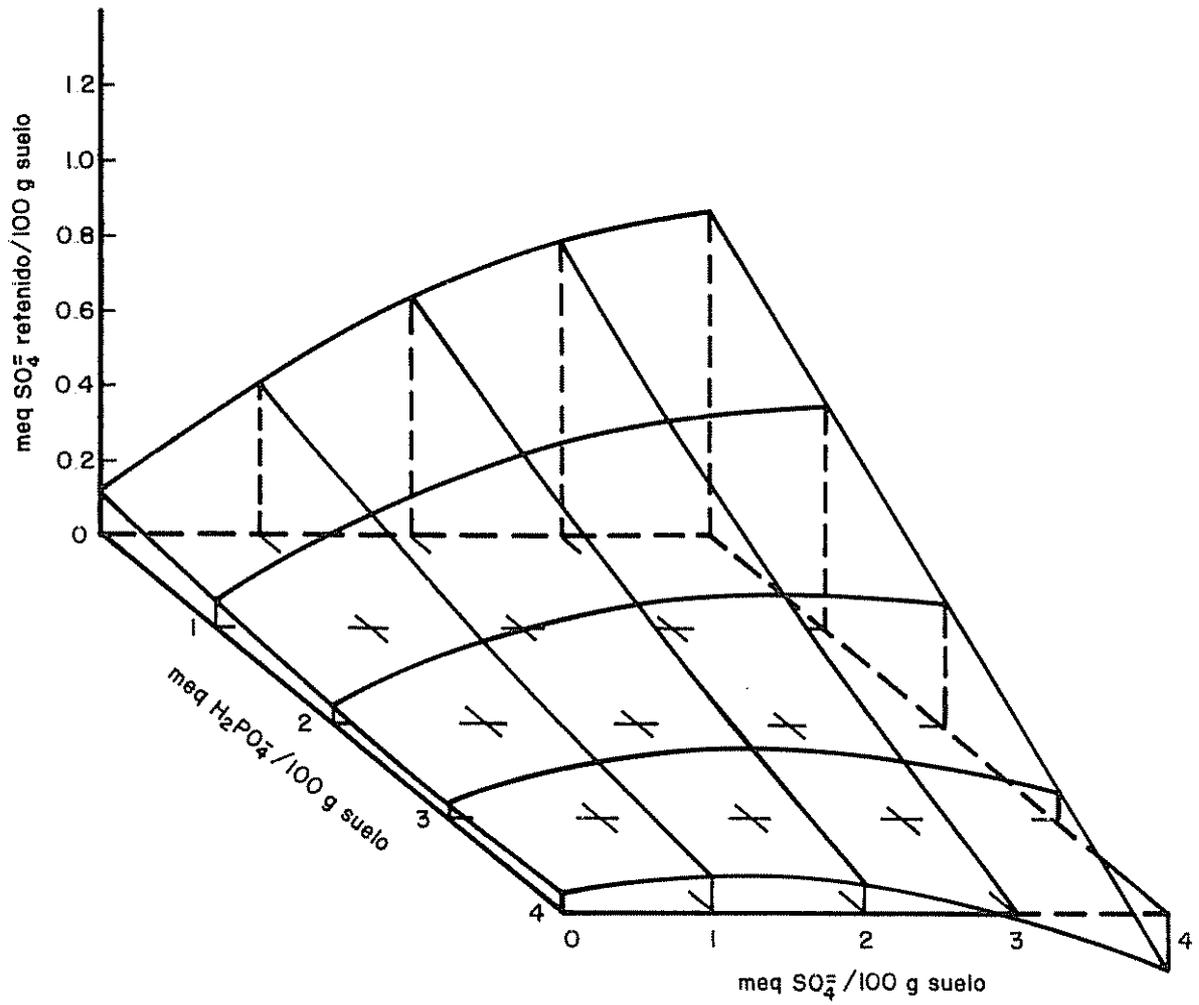


Fig. 7 - Retención de SO₄²⁻ a diferentes niveles de H₂PO₄⁻ y SO₄²⁻ ofrecido al suelo N^o 10 (Bagaces)

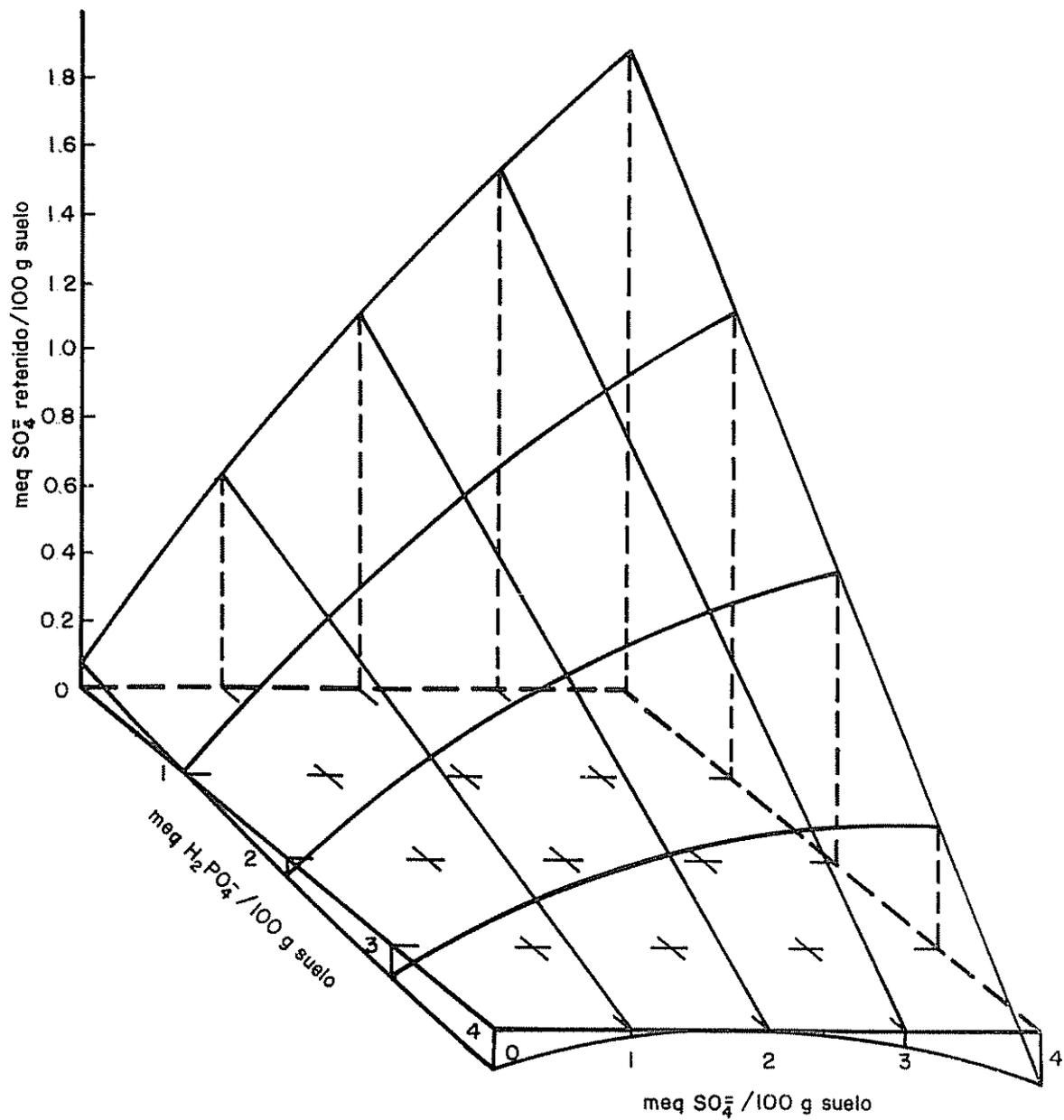


Fig 8 - Retención de SO_4^{2-} a diferentes niveles de H_2PO_4^- y SO_4^{2-} ofrecido al suelo N° 4 (Buenos Aires)

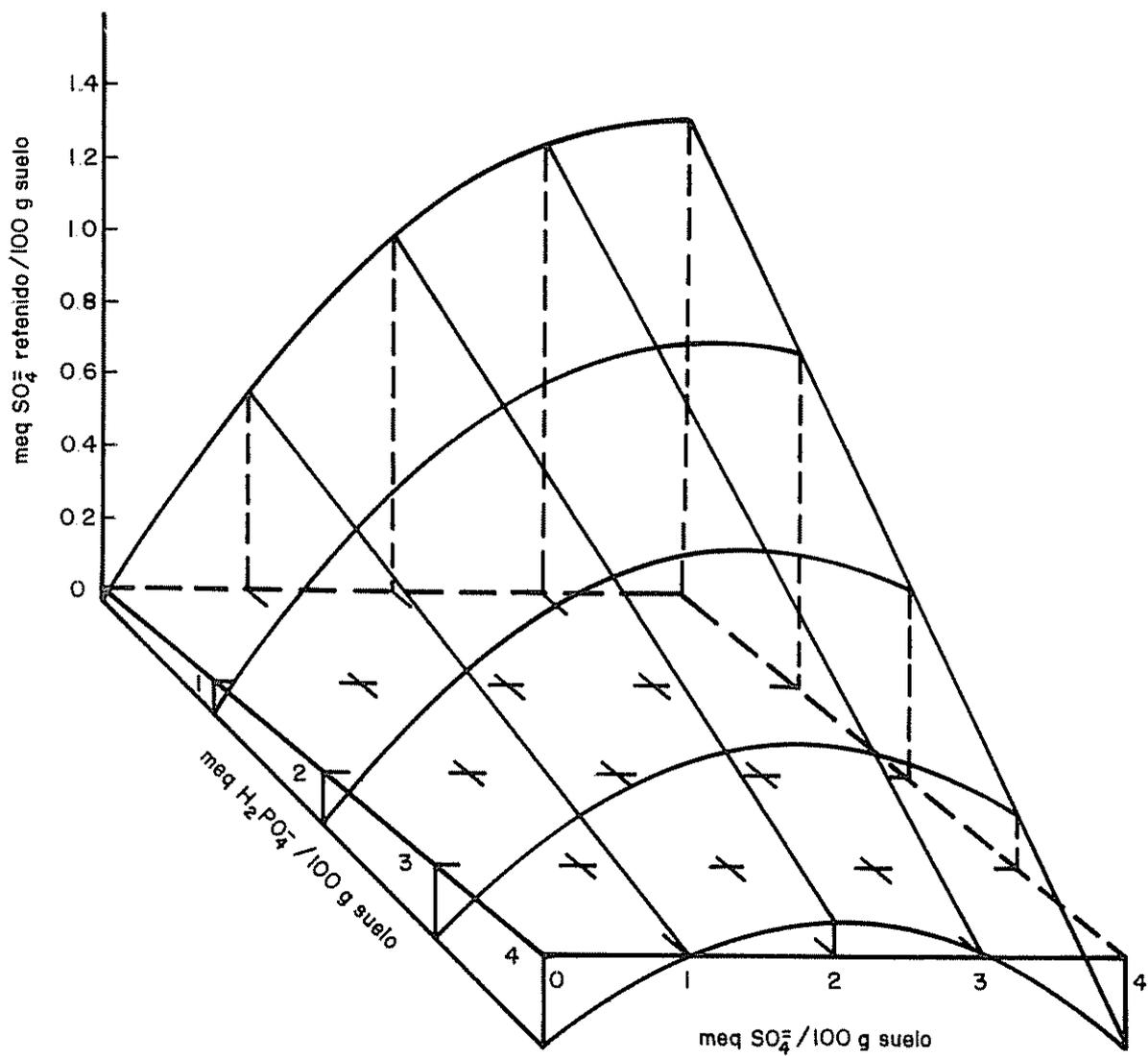


Fig. 9 - Retención de SO_4^{2-} a diferentes niveles de H_2PO_4^- y SO_4^{2-} ofrecido al suelo N° 23 (Juan Viñas)

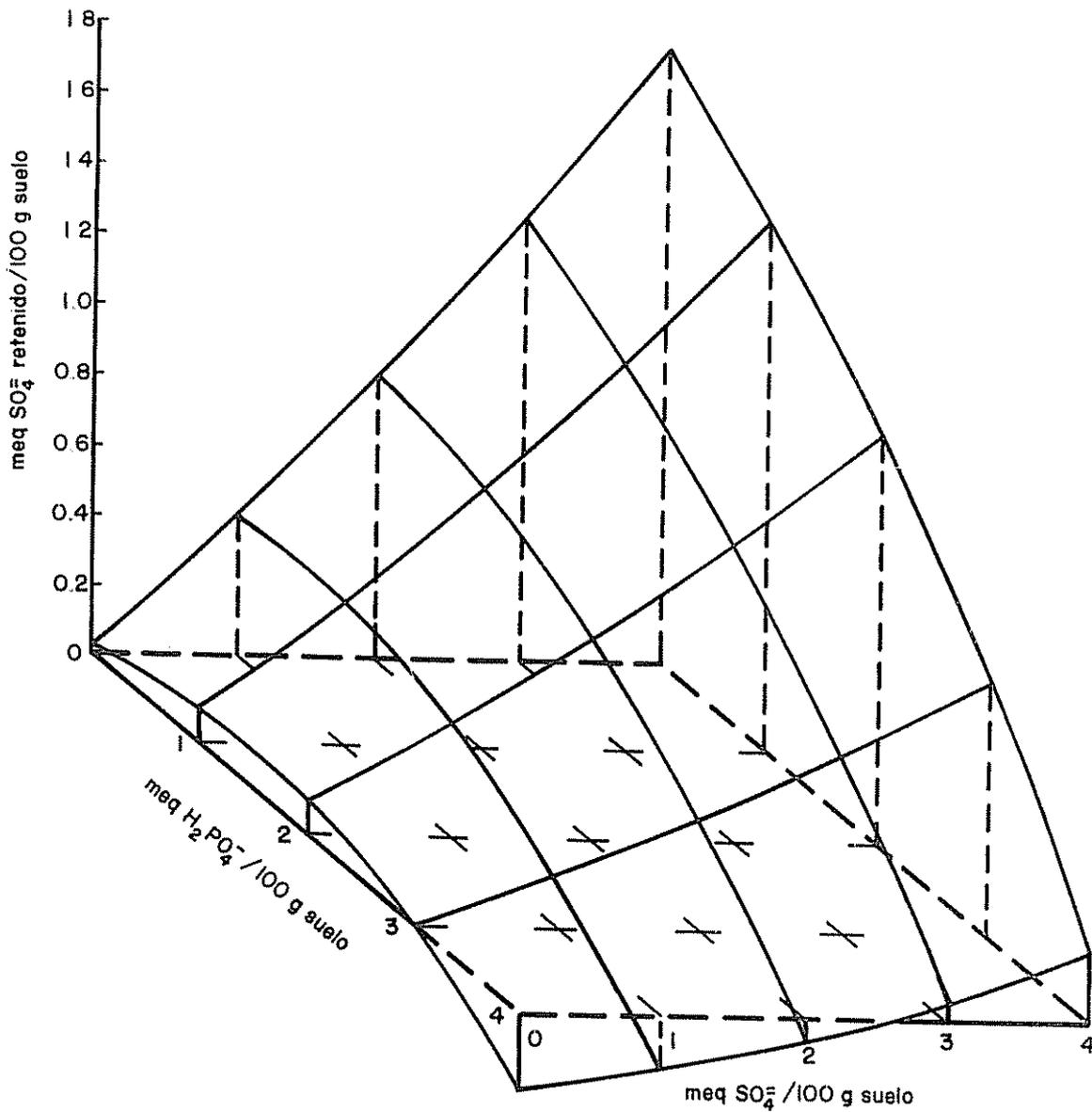


Fig. 10 - Retención de SO_4^{2-} a diferentes niveles de H_2PO_4^- y SO_4^{2-} ofrecido al suelo N° 17 (La Argentina)

de materia orgánica y todas estas fracciones influyen en la retención de sulfatos.

Aparentemente habría una contradicción en lo referente a la alofana porque se ha dicho que esta tiene capacidad limitada de retención de sulfatos y en este estudio el suelo No. 4 de alta retención parece tener más alofana que el No. 10 de retención baja, pero en ambos casos la curva de retención es cuadrática. El suelo No. 23 (Juan Viñas) mostró una tendencia a la saturación más acentuada que en el suelo No. 10 probablemente por tener pH más bajo (5.0) y mayor contenido de materia orgánica (18.9%). Los dos suelos 10 y 4 se ajustan a la isoterma de Langmuir indicando retención máxima.

El comportamiento del suelo No. 17 es difícil de explicar porque el pH es mayor que el del suelo No. 4, con retención alta, tiene menos materia orgánica y aparentemente menos alofana y sin embargo, retienen más que los otros; probablemente se deba a su composición mineralógica o su contenido en óxidos libres de hierro y aluminio. Esto demuestra, que en el fenómeno de retención de sulfatos no se puede decir que tal o cual componente es el que lo retiene sino al parecer que varios interactuaron entre ellos dando resultados difíciles de explicar, por el momento con la información disponible.

En las Figuras 7, 8 y 9 se ve que es diferente el comportamiento del sulfato en presencia de 4 meq H_2PO_4^- /100 g de suelo, pero en todos cuando se añade 4 meq SO_4^{2-} /100 g de suelo hay desorción de sulfato lo que indica que a ese nivel cesa la activación de sitios o mecanismos de retención de sulfatos, cosa que parece ser efectiva entre 1 y 2 meq SO_4^{2-} /100 g de suelo. En el suelo No. 17 a mayor cantidad de sulfato añadido mayor es la retención,

inclusive en presencia de 4 meq $H_2PO_4^-$ /100 g de suelo.

En las cuatro figuras, a excepción del suelo No. 17, el efecto del fosfato es lineal.

En las Figuras 11, 12, 13 y 14 se representan la retención de fosfato ($H_2PO_4^-$) a diferentes niveles de sulfato y fosfato respectivamente, para los suelos No. 10 (Bagaces) de baja retención, suelo No. 4 (Buenos Aires) de retención alta, suelo No. 23 (Juan Viñas) de retención media y suelo No. 17 (La Argentina). Se ve que con los niveles utilizados el suelo No. 4 prácticamente retiene todo lo que se le añade de fosfato mientras que los suelos No. 10 y 17 parecen estar llegando a la saturación por la tendencia cuadrática que presentan; el suelo No. 23 tiene tendencia lineal al igual que el No. 4 pero tiene menor avidez hacia el fosfato, como lo demuestran los coeficientes b_1 del Cuadro 14 (b).

Las explicaciones de la diferente cantidad de fosfato retenido por los suelos pueden ser los mismos que en el caso de los sulfatos: pH, materia orgánica, óxidos hidratados de hierro y aluminio y alofana, porque en el suelo No. 10 las tendencias son cuadráticas (Figuras 7 y 11) para ambos aniones, pero también pueden ser otros no considerados en este estudio porque en los suelos Nos. 4, 23 y 26 presentan tendencias diferentes en la retención de sulfatos y fosfatos siendo más notable en el suelo 23. La retención de sulfatos tiende a la saturación, mientras la de fosfato es lineal, lo que significa que el material volcánico tiene mayor capacidad de retener fosfato que sulfato porque el suelo de Juan Viñas es un inceptisol (andept). Sin embargo, este suelo se ajustó mejor a la isoterma de Freundlich en retención de azufre, lo cual podría deberse a que en ese experimento las concentraciones de sulfato ofrecido fueron altas favoreciendo la activación

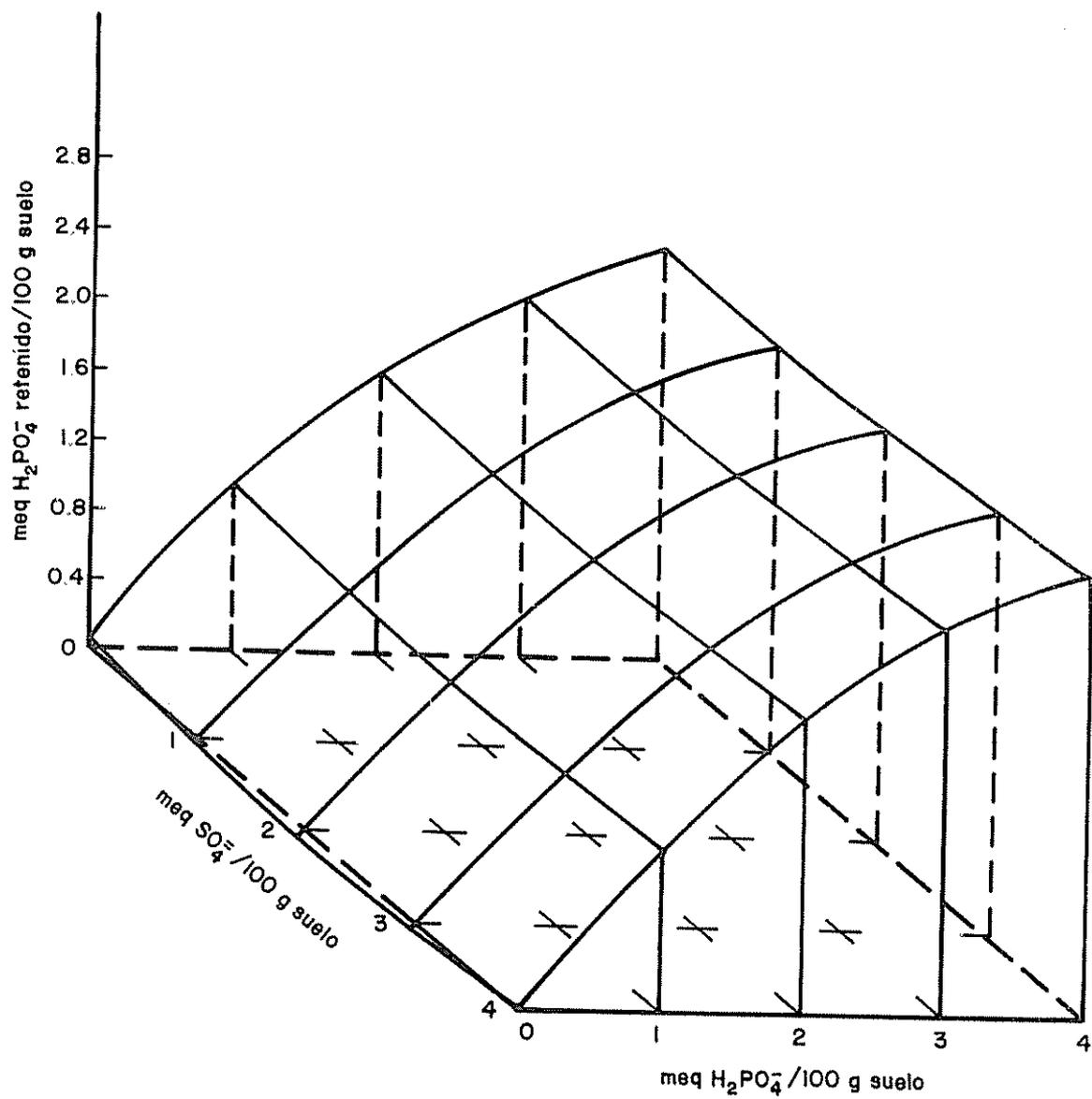


Fig. II -- Retención de H_2PO_4^- a diferentes niveles de H_2PO_4^- y SO_4^- ofrecido al suelo N° 10 (Bagaces)

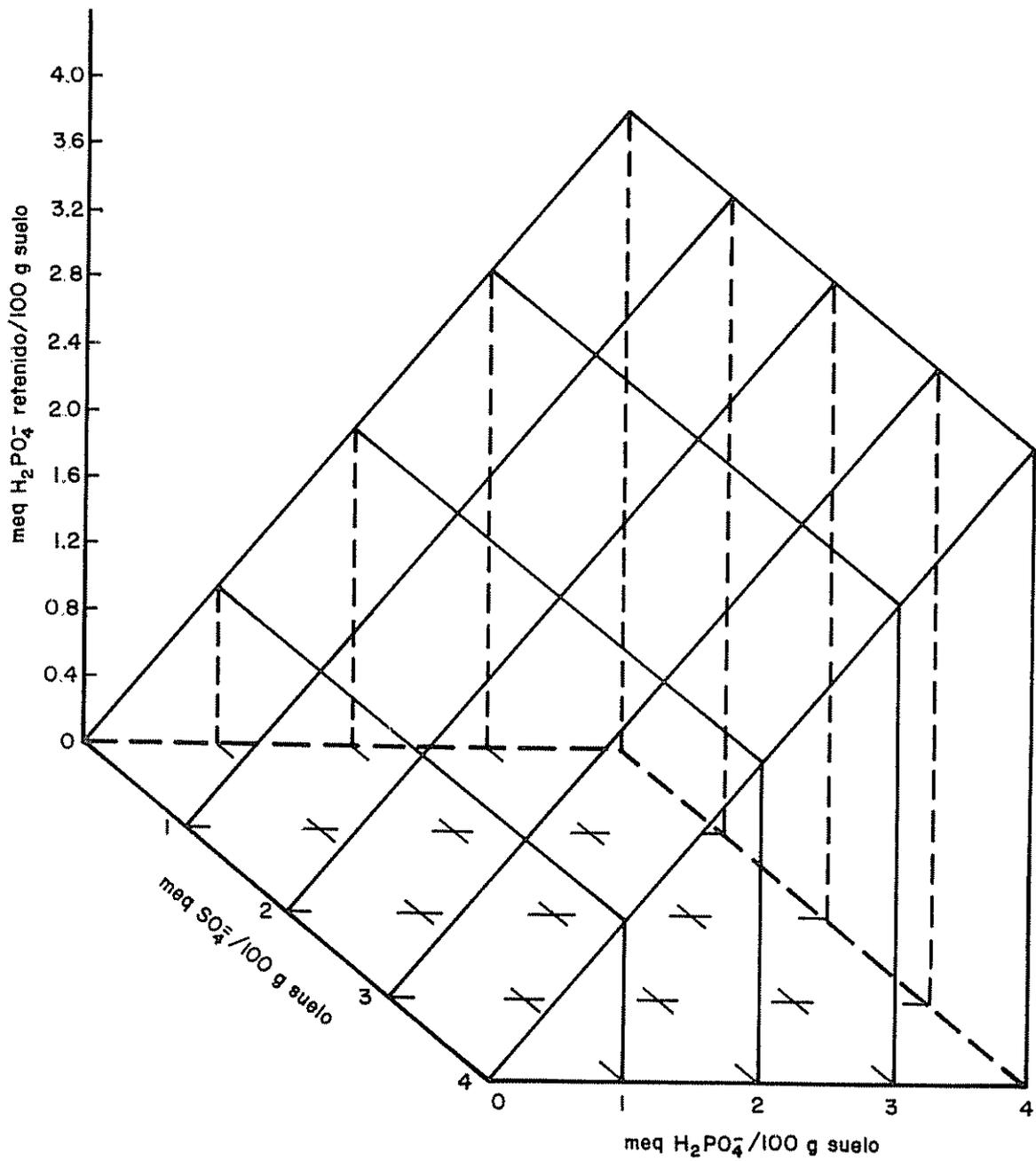


Fig. 12 - Retención de H₂PO₄⁻ a diferentes niveles de H₂PO₄⁻ y SO₄⁻ ofrecido al suelo N° 4 (Buenos Aires)

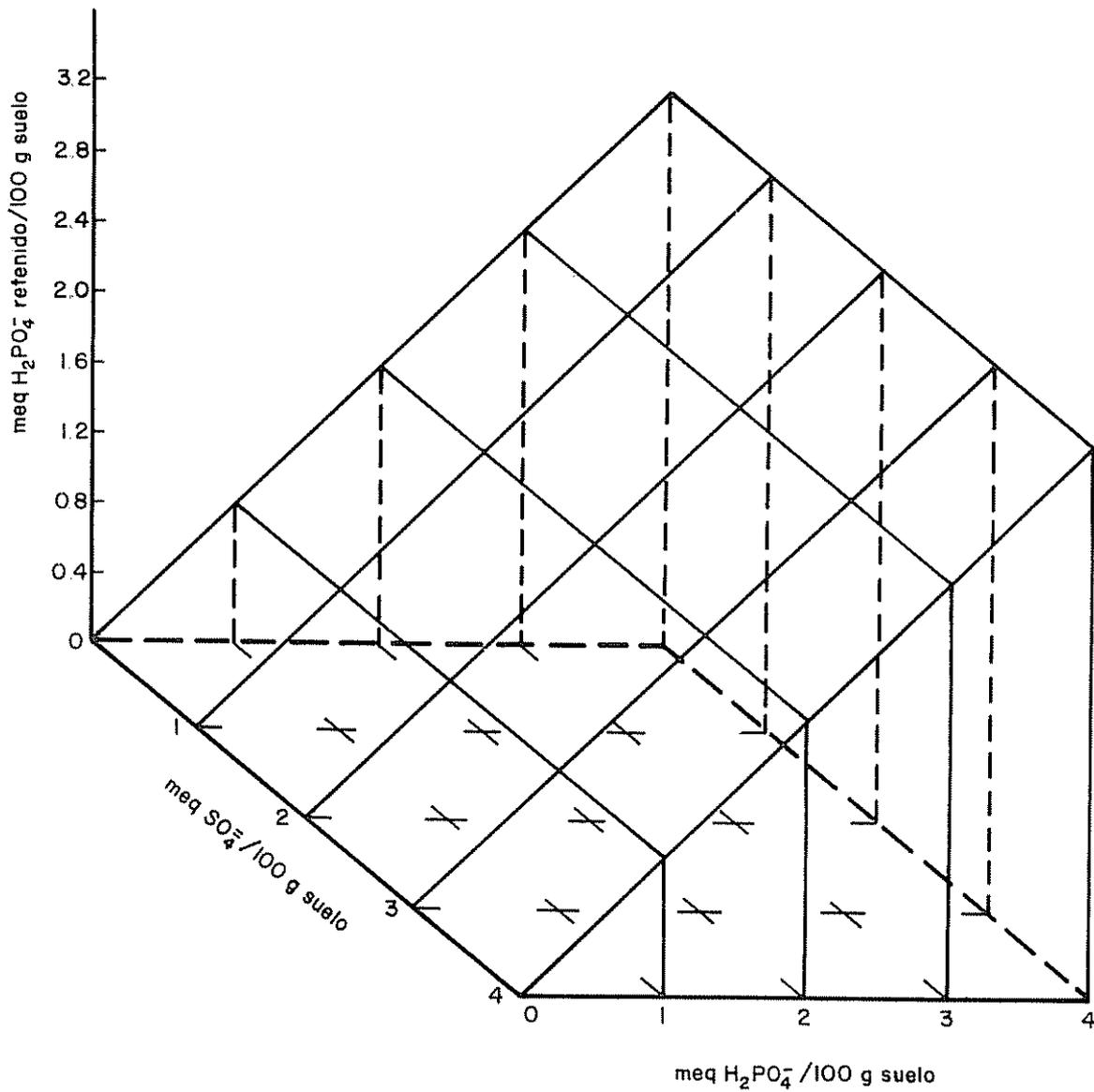


Fig. 13 - Retención de H_2PO_4^- a diferentes niveles de H_2PO_4^- y $\text{SO}_4^{=}$ ofrecido al suelo N° 23 (Juan Viñas)

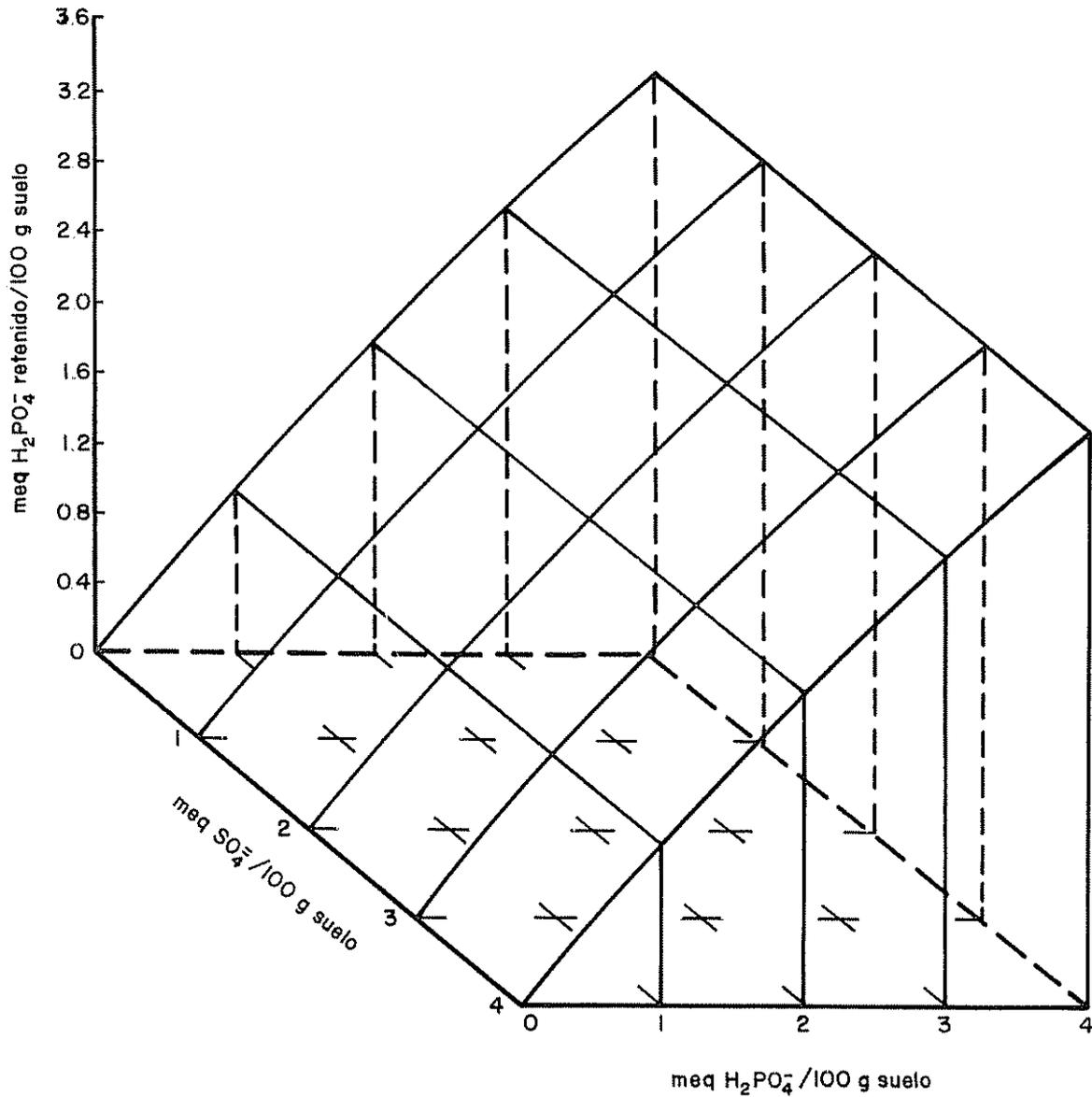


Fig 14 -- Retención de $H_2PO_4^-$ a diferentes niveles de $H_2PO_4^-$ y SO_4^{2-} ofrecido al suelo N° 17 (La Argentina)

de sitios o mecanismos de retención en la fracción inorgánica o a su alto contenido de materia orgánica.

En el suelo No. 17 (Figuras 10 y 14) el comportamiento de la retención de los aniones considerados es diferente mientras que la retención del sulfato se incrementa al aumentar la cantidad de sulfato ofrecido el fosfato es ligeramente cuadrático, resultando difícil explicar con los datos disponibles.

El hecho de que la mayoría de los suelos presenten desorción de su sulfato nativo con niveles altos de fosfato indica la importancia del conocimiento del comportamiento de cada suelo frente a la reacción de estos dos iones, porque un exceso de fosfato puede causar pérdidas sensibles de sulfato que saldría en el agua de drenaje. Por otro lado, indica que al aumentar la concentración de sulfato en la solución del suelo, que se encuentra en equilibrio cinético con el sulfato retenido (24), se activan sitios o mecanismos que permiten una mayor retención de sulfato.

Es por todo esto que se debe buscar los niveles de modo que se llegue a un equilibrio en la disponibilidad de los elementos para las plantas.

5.3 Formas de azufre y su distribución en el perfil

En el estudio del fraccionamiento del S en los perfiles de suelos se encontró que a las profundidades de 0-20 y 20-40 cm el contenido de materia orgánica correlaciona de manera altamente significativa con el S-total. También en las muestras de 0-20 cm se encontraron correlaciones altamente significativas entre S-total y N-total y entre S-orgánico y N-total (Cuadro 13).

Se supone que esto se debe a que los residuos vegetales son buenas

fuentes de S por el reciclaje del elemento, datos similares fueron obtenidos por Schalscha (62) y Lowe (49), mientras que Blasco (12) encontró más bien una relación baja.

En las cinco profundidades muestreadas se encontró correlaciones altamente significativas ($P = 0.01$) entre el S-orgánico y la materia orgánica.

Hasta 60 cm de profundidad el S-total está altamente correlacionado con la materia orgánica, lo que indica que hasta esa profundidad la materia orgánica varía directamente con el contenido del S-total. De 0 hasta 20 cm el S-orgánico no correlacionó bien con el S-disponible, pero si hubo significación entre las mismas variables de 20-40 cm entre S-disponible y materia orgánica. Esto nos indica que la mineralización del S-orgánico es más importante como fuente de S-disponible de 20-40 cm que a 0-20 cm, esto posiblemente debido a mejores condiciones para la actividad microbiana a esas profundidades o a una materia orgánica más fácilmente descomponible. Lowe (49, 50) obtuvo las mismas relaciones entre S-adsorbido y materia orgánica.

Sólo de 20-40 cm hubo significación entre S-total y S-disponible, puede deberse a que a ese nivel se encontró el coeficiente de correlación más alto entre S-total y S-orgánico ya que a esa profundidad la materia orgánica es componente importante del S-total y parece que mineraliza fácilmente.

De 40-60 cm se encontró correlación significativa, pero negativa, entre pH medido en agua y S-orgánico, lo que quiere decir que a menor pH mayor es la cantidad de S-orgánico o viceversa, a esta profundidad a un pH bajo no se mineraliza fácilmente la materia orgánica probablemente debido a que en condiciones muy ácidas la actividad microbiana para oxidar el S es pobre, aunque Blasco (12) indica que el Thiobacillus thiooxidans actúa mejor en

condiciones ácidas.

Observando los resultados de retención de S-con los del S-disponible se debería esperar que los suelos menos retentivos tengan mayor contenido de S-disponible en los horizontes inferiores; en nuestro caso seis suelos más bajos en retenciones de S que mostraron retención entre 340-690 ug S/g de suelo presentaron esa tendencia y dos suelos con retenciones de 470 y 590 ug S/g de suelo lo presentaron a 60-80 cm de profundidad. No se encontró una relación clara entre el S-disponible y el S retenido por el método de Chao, para muestras de 0-20 cm de profundidad, lo que nos demuestra que el fenómeno es complejo y no depende de un solo factor sino que se interrelacionan varios de modo que cada suelo presenta sus tendencias y particularidades.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en este estudio se establecen las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. La retención de sulfatos en estos suelos correlaciona positivamente con la materia orgánica y negativamente con los cationes cambiabiles. Al parecer la alofana podría jugar papel importante.
2. La retención de sulfatos en nueve suelos se ajustó a la isoterma de Langmuir y en 21 a la de Freundlich y en todos el fenómeno parece seguir la tendencia de la curva tipo II de Brunauer que corresponde a la adsorción multimolecular.
3. La retención de sulfatos con los métodos de Chao y Kamprath siguen los mismos patrones.
4. En el estudio de la relación fosfato-sulfato todos los 11 suelos muestran mayor capacidad de retención de fosfatos, el efecto de estos sobre la retención de sulfatos es variable y en todos los casos a mayor nivel de fosfatos menor es la retención del sulfato.
5. El contenido de S-total, S-orgánico y S-disponible es variable en los 30 suelos y dentro de cada perfil, observándose el nivel más alto de S-disponible a diferentes profundidades y buena relación entre el S-total, el S-orgánico y la materia orgánica.
6. Para una mejor comprensión de la retención de sulfatos en estos suelos se recomienda hacer un estudio de los minerales de arcilla, alofana y óxidos hidratados de hierro y aluminio de los mismos suelos.
7. Como es evidente el efecto depresivo del fosfato en la retención del sulfato se hace necesario la realización de experimentos con plantas

tratando de encontrar la relación óptima entre ambos aniones.

8. Cuando se usa la técnica de saturar la capacidad de fijación de fósforo del suelo se recomienda tener en cuenta que dosis altas de este producen desorción del sulfato nativo del suelo.

7. RESUMEN

En vista de la importancia que viene adquiriendo el estudio del azufre en el trópico húmedo y subhúmedo, se hizo este estudio exploratorio, con el objeto de determinar el comportamiento del sulfato en el fenómeno de retención, frente a diferentes niveles de fósforo y ver, también, su distribución y formas en 30 perfiles de suelos de interés agropecuario de Costa Rica. Los suelos se seleccionaron para dar una imagen amplia aunque poco detallada.

Se determinó que los suelos tienen diferente comportamiento en la retención de sulfatos y al equilibrarlos con 2500 ug S/g de suelo las cantidades retenidas variaron de 340 a 1260 ug S/g de suelo.

Las curvas de retención de sulfatos corresponden al tipo II de Brunauer, indicando retención multimolecular; sin embargo, nueve suelos se ajustaron mejor a la isoterma de Langmuir y 21 a la de Freundlich, pudiendo jugar en esto papel importante la alofana.

Se encontró correlación entre retención de sulfato y el contenido de materia orgánica ($r = 0.62^{**}$) y correlación negativa con el Ca-cambiable ($r = -0.54^{**}$) y con la suma de cationes cambiables ($r = -0.54^{**}$), no así con el pH y el contenido de arcilla.

La retención de sulfato con el método de Chao correlacionó bien con la obtenida con el método de Kamprath ($r = 0.91^{**}$ y $r = 0.86^{**}$) a dos niveles de azufre ofrecido.

En el estudio de la relación fósforo-sulfato se encontró que el fósforo desaloja al sulfato o que ocupa los sitios de retención impidiendo que los sulfatos sean almacenados; cada suelo tiene un modo particular de

comportamiento frente a los dos aniones y en todos los casos los suelos manifiestan tener mayor capacidad de retener fosfatos. En la retención de ambos aniones hay relaciones con propiedades químicas y posiblemente mineralógicas del suelo.

La distribución del S-total, S-orgánico y S-disponible es variable en los 30 suelos y dentro de un mismo perfil no muestran tendencias claras.

Hasta 40 cm de profundidad se encontró relación entre el S-total y la materia orgánica, en varios suelos se determinó los mayores contenidos de S-disponible a profundidades que varían de 40 cm hasta 100 cm de profundidad indicando posiblemente arrastre por el agua de lluvias.

7a. SUMMARY

In view of the recent importance being given sulfur in the subhumid and humid tropics an exploratory estudy was conducted to determine sulfate retention capacities of different sulfate and phosphate levels and also to measure the amounts of the different forms of sulfur in 30 soil profiles in Costa Rica.

The different sites was selected to give a wide range in environmental conditions and soils although the study was not especific for any give area.

When the different soils were equilibrated with 2500 ug S/g of soil, amounts of sulfur retained varied from 340 to 1260 ug S/g of soil.

The sulfate retention curves corresponded to the type II as described by Brunauer, indicating multimolecular retention; however, nine soils gave a better fit to Langmuir isotherms and 21 were better explained by Freundlich isotherms. A positive test for alofane in most cases corresponded to those soils with fit Langmuir isotherms.

Sulfate retention was positively correlated with organic matter contents ($r = 0.64^{**}$) and negatively correlated with exchangeable Ca ($r = -0.54^{**}$) and with the sum of cations ($r = -0.54^{**}$), however, no relation was found with pH and clay content.

Sulfate retentions at two sulfate levels as determined by Chao correlated with amounts of sulfate retained with a method described by Kamprath for phosphorus fixation ($r = 0.91^{**}$ and $r = 0.86^{**}$).

When various levels of sulfate and phosphate were added to 11 soils, the phosphate anion replaced sulfate or occupied sites impiding the retention

of sulfates. Each soil behaved differently in the retention of the two anions, but in all cases phosphate was retained in larger amounts than sulfate.

In many cases soil chemical properties explained the retention of the two anions studied.

The distribution of total S, organic S and available S was different in all 30 soils and no clear tendencies were found within specific profiles.

A relation between total S and organic matter content was found from 0 to 40 cm and in various soils the largest contents of available S was found at depths that varied from 40 to 100 cm indicating sulfate movement by leaching.

8. LITERATURA CITADA

1. ALLAWAY, W. H. y THOMPSON, J. F. Sulfur in the nutrition of plants and animals. *Soil Science* 101(4):240-247. 1966.
2. AYRES, S. S. y HAGIHARA, H. H. Effect of the anion on the sorption of potassium by some humic and hydrol humic latosols. *Soil Science* 75(1):1-17. 1953.
3. BARDSLEY, C. E. y LANCASTER, J. D. Sulfur. In Black, C. A. ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp. 1102-1116.
4. BARROW, N. J. Studies on extraction and availability to plants of adsorbed plus soluble sulfate. *Soil Science* 104(4):242-249. 1967.
5. _____. Studies on the adsorption of sulfate by soils. *Soil Science* 104(5):342-349. 1967.
6. _____. SPENCER, K. y McARTHUR, W. M. Effects of rainfall and parent material on the ability of soils to adsorb sulfate. *Soil Science* 108(2):120-126. 1969.
7. _____. Effects of adsorption of sulfate by soils on the amount of sulfate present and the availability to plants. *Soil Science* 108(3):193-201. 1969.
8. _____. Influence of solution concentration of calcium on the adsorption of phosphate, sulfate and molybdate by soils. *Soil Science* 113(3):175-180. 1972.
9. BEATON, J. D., BURNS, G. R. y PLATOU, J. Determination of sulphur in soils and plant material. The Sulphur Institute. Technical Bulletin no. 14. 1968. 56 p.
10. BERLANGA ZAMUDIO, I. M. Estudio de la fertilidad de los suelos del área de ganadería IICA-CTEI, Turrialba. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 99 p.
11. BLASCO, M. Curso de Microbiología de Suelos. Turrialba, Costa Rica, IICA-CTEI, 1970. pp. 183.
12. _____. Contenido y metabolismo del azufre en suelos volcánicos de Centro América. Turrialba, IICA. 1972. 27 p. (Mimeografiado).
13. BORNEMISZA, E. Categorías de azufre en suelos de la Meseta Central. Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industrias. Lab. Químico de Inv. Agronómicas. Inf. polig. 56-1. 1959.

14. BORNEMISZA, E. y LLANOS, R. Sulfate movement, adsorption and desorption in three Costa Rican soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 31(3):356-360. 1967.
15. _____ y IGUE, K. Oxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. *Turrialba* 17(1):23-30. 1967.
16. _____. Minerales de Arcilla en suelos centroamericanos y de Panamá. *Turrialba* 19(1):97-102. 1969.
17. _____ y MORALES, J. C. Soil chemical characteristics of recent volcanic ash. *Soil Science Society of America Proceedings* 33(4): 528-530. 1969.
18. BOUYOUCUS G. Recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal* 43(9):434-438. 1951.
19. BREMNER, J. M. Total nitrogen. In Black, C. A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy 1965. pp. 1149-1178.
20. BURBANO ORJUELA, H. I. Metabolismo del azufre en suelos agrícolas de Nicaragua. Tesis Mag. Sc., Turrialba, Costa Rica, IICA, 1973. 92 p.
21. CAIRNS, R. R. y RICHER, A. C. Comparative study of a sulphur responsive and non-responsive grey wooded soil. *Canadian Journal of Soil Science* 40(2):246-254. 1960.
22. CHANG, M. L. y THOMAS, G. W. A suggested mechanism for sulfate adsorption by soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 27(3):281-283. 1963.
23. CHAO, T. T., HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Movement of S^{35} tagged sulfate through soil columns. *Soil Science Society of America Proceedings* 26(1):27-32. 1962.
24. _____. HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Adsorption and desorption phenomena of sulfate ions in soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 26(3):234-237. 1962.
25. _____. HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Soil constituents and properties in the adsorption of sulfate ions. *Soil Science* 94(5): 276-283. 1962.
26. _____. HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Cationic effects on sulfate adsorption by soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 27(1):35-38. 1963.
27. _____. Anionic effects on sulfate adsorption by soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(4):581-583. 1964.

28. CHAO, T. T., HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Iron or aluminum coatings in relation to sulfate adsorption characteristics of soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 28(5):632-635. 1964.
29. _____, HARWARD, M. E. y FANG, S. C. Exchange reactions between hydroxyl and sulfate ions in soils. *Soil Science* 99(2):104-108. 1965.
30. CHAUDRY, I. A. y CORNFIELD, A. H. The determination of total sulphur in soil and plant material. *Analyst* 91(1085):528-530. 1966.
31. COLEMAN, R. The importance of sulfur as a plant nutrient in world crop production. *Soil Science* 101(4):230-239. 1966.
32. CORDERO, A. y SALAS, J. Evaluación de la fertilidad de tres suelos aluviales de Costa Rica mediante el método de las microparcels de maíz. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1971. 29 p.
33. _____. Problemas de fertilidad de algunos suelos de Guanacaste bajo explotación ganadera. *Noticiero de Agronomía (Costa Rica)* 1(9):1-4 1972.
34. CROCKER, W. Sulfur deficiency en soil. *Soil Science* 60(1):149-154. 1945.
35. ELKINS, D. M. y ENSMINGER, L. E. Effect of soil pH on the availability of adsorbed sulfate. *Soil Science Society of America Proceedings* 35(6):931-934. 1971.
36. ENSMINGER, L. E. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 18(3):259-264. 1954.
37. FANG, S. C., NANCE, R. D., CHAO, T. T. y HARWARD, M. E. A chromatographic approach to the determination of sulfate adsorption and exchange of less-retentive soils. *Soil Science* 94(1):14-18. 1962.
38. HAQUE, I. y WALMSLEY, D. Movement of sulphate in two caribbean soils. *Plant and Soil* 40(1):145-152. 1974.
39. HARWARD, M. E. y REISENAUER, H. M. Reactions and movement of inorganic soil sulfur. *Soil Science* 101(4):326-335. 1966.
40. HARRIS, S. A., NEUMANN, A. M. y STOUSE, P. A. The major soil zones of Costa Rica. *Soil Science* 112(6):439-447. 1971.
41. HINOJOSA VELASCO, E. Influencia del nitrógeno y el azufre en el rendimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1973. 84 p.

42. HOEFT, R. G., WALSH, L. M. y KEENEY, D. R. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. *Soil Science Society of America Proceedings* 37(3):401-404. 1973.
43. HUNTER, A. H. Soil analytical procedure using the modified NaHCO_3 extracting solution. North Carolina State University, International Soil Fertility Evaluation & Improvement Program. 6 p. (Mimeografiado).
44. JORDAN, H. V. y ENSMINGER, L. E. The role of sulfur in soil fertility. *Advances in Agronomy* 10:407-434. 1958.
45. KAMPATH, E. J., NELSON, W. L. y FITTS, J. W. The effect of pH, sulfate and phosphate concentrations on the adsorption of sulfate by soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 20(4):463-466. 1956.
46. _____. Sulphur reactions and availability in highly weathered soils. *The Sulphur Institute Journal*. 1968.
47. _____. Sulfur. In Sánchez, P. A., ed. A review of soil research in tropical Latin America. Raleigh, North Carolina State University, Soil Science Department, 1972. pp. 238-243.
48. KUNIN, R. y MEYERS, R. J. The anion exchange equilibria in an anion exchange resin. *Journal of American Chemical Society* 69:2874-2878. 1947.
49. LOWE, L. E. Sulphur fractions of selected Alberta soils profiles of the chernozemic and podsollic orders. *Canadian Journal of Soil Science* 45(3):297-303. 1965.
50. _____. Sulfur fractions of selected Alberta profiles of the gleysolic order. *Canadian Journal of Soil Science* 49(3):375-381. 1969.
51. MACINTIRE, W. H., SHAW, W. M. y ROBINSON, B. The divergent behavior of KPO_3 and K_2SO_4 in soils with and without limestone and dolomite. *Soil Science* 59:155-162. 1945.
52. MARTIN, W. E. y WALKER, T. W. Sulfur requirements and fertilization of pasture and forage crops. *Soil Science* 101-(4):248-257. 1966.
53. MARTINI, J. A. Caracterización del estado nutricional de los principales "latosoles" de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. *Turrialba* 19(3):394-408. 1969.
54. _____. Caracterización del estado nutricional de los principales andosoles de Costa Rica, mediante la técnica del elemento faltante en el invernadero. *Turrialba* 20(1):72-84. 1970.

55. MASSOUMI, A. y CORNFIELD, A. H. A rapid method for determining sulphate in water extracts of soils. *Analyst* 88:321-322. 1963.
56. MONTES, R. et al. Comparación de varias soluciones extractoras de fósforo disponible del suelo y sus niveles críticos en estudios de invernadero. San José, Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. 14 p. (Mimeografiado).
57. MULLER, L. E. Deficiencia de azufre en algunos suelos de Centro América. *Turrialba* 15(3):208-215. 1965.
58. NELLER, J. R. Extractable sulfate-sulfur in soils of Florida in relation to amount of clay in the profile. *Soil Science Society of America Proceedings* 23(5):346-348. 1959.
59. OLSEN, S. R. y WATANABE, F. S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soil as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Science Society of America Proceedings* 21(2):144-149. 1957.
- 59a. PEREZ ABREU, A. Evaluación del azufre disponible en algunos suelos agrícolas de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1974. 68 p.
- 59b. RAMOS, A. M. Influencia de lixiviación de aniones en pérdidas por arrastre de cationes. *Stica Costa Rica, Inf. Téc.* 6. 1958. 31 p.
60. SAIZ DEL RIO, J. F. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos métodos de laboratorio para diagnosis de fertilidad. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 107 p.
61. SALINAS CASTRO, J. G. Efectos de la inoculación y fertilización nitrogenadas sobre la producción de soya (Glycine max (L) Merril). Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1973. 68 p.
62. SCHALSCHA, E. B., ESTRADA, C. y GALINDO, G. G. Sulfur status of some volcanic ash derived soils in Chile. *Agrochemica* 16(1-2):77-82. 1971-1972.
63. SPENCER, K. Soil properties in relation to the sulphur and phosphorus status of some basaltic soils. *Australian Journal of Soil Research* 4(2):115-130. 1966.
64. STARKEY, R. Relation of microorganisms to transformation of soil sulfur in soils. *Soil Science* 70(1):55-65. 1950.
65. TABATABAI, M. A. y BREMNER, J. M. Forms of sulfur, and carbon, nitrogen and sulfur relationships, in Iowa soils. *Soil Science* 144(5):380-386. 1972.
66. TOSI JUNIOR, J. A. República de Costa Rica, Mapa Ecológico. San José, Costa Rica, Centro Científico Tropical. 1969. Esc. 1:750000. Color.

67. WAUGH, D. L. y FITTS, J. W. Soil test interpretation studies. Laboratory and potted plant. North Carolina State University, Agriculture Experiment Station. Technical Bulletin no. 3. 1966. 33 p.
68. WHITEHEAD, D. C. Soil and plant-nutrition aspects of the sulphur cycle. Soils and Fertilizers 27(1):1-9. 1964.
69. WILLIAMS, C. H. Seasonal fluctuations in mineral sulphur under subterranean clover pasture in southern New South Wales. Australian Journal of Soil Research 6(1):131-140. 1968.

APENDICE

Cuadro 1. Parámetros de las isotermas de retención de $\text{SO}_4^{=}$ ajustados a tres modelos matemáticos de los 30 suelos.

Suelo No.	Lineal		Logarítmico		Cuadrático		
	a	b	a	b	a	b ₁	b ₂
1	41.51	0.63	0.73	0.83	51.35	0.52	0.0002
2	102.16	0.67	1.57	0.74	53.81	1.22	-0.0010
3	155.56	0.86	2.98	0.54	159.97	0.81	0.0001
4	233.73	0.80	3.40	0.50	103.63	2.28	-0.0027
5	33.37	0.83	0.44	0.91	55.90	0.57	0.0005
6	33.21	0.83	0.44	0.91	44.77	0.41	0.0002
7	33.97	0.87	-0.12	1.02	51.72	0.67	0.0004
8	78.33	0.66	-0.49	1.08	34.71	1.15	-0.0009
9	43.92	1.17	-1.54	1.32	-70.14	2.46	-0.0024
10	85.15	0.68	1.76	0.69	51.17	1.07	-0.0009
11	48.71	0.72	-0.66	1.11	69.23	0.55	0.0004
12	56.05	0.93	0.74	0.90	-28.52	1.94	-0.0018
13	130.90	1.02	2.24	0.68	80.30	1.64	-0.0011
14	180.00	1.60	2.60	0.69	63.80	2.91	-0.0024
15	130.22	0.41	2.90	0.47	98.47	0.77	-0.0007
16	137.37	1.26	1.99	0.75	50.60	2.24	-0.0018
17	237.07	1.29	3.24	0.57	143.13	2.35	-0.0020
18	127.42	1.36	2.03	0.75	81.30	1.88	-0.0010
19	116.77	1.32	1.43	0.85	-12.40	2.78	-0.0027
20	187.56	1.42	2.67	0.67	125.85	2.11	-0.0013
21	10.93	1.35	-0.98	1.23	-40.38	1.93	-0.0011
22	149.62	1.28	2.27	0.71	56.43	2.33	-0.0019
23	27.01	2.59	1.81	0.85	90.77	1.86	0.0013
24	126.36	1.95	2.96	0.63	315.42	-0.19	0.0039
25	15.62	0.96	-1.48	1.27	-39.51	1.58	-0.0012
26	-41.70	1.41	-3.22	1.60	22.58	0.68	0.0013
27	82.44	1.58	1.65	0.82	152.16	0.80	0.0015
28	16.16	1.19	0.55	0.94	32.92	1.00	0.0003
29	-44.05	1.38	-1.73	1.32	-93.72	1.94	-0.0010
30	162.05	1.66	2.55	0.70	82.49	2.56	-0.0017

Cuadro 2. Análisis de variancia de la retención de sulfato y fosfato de los suelos del estudio de la relación fosfato-sulfato.

F. V.	G. L.	SC	CM	Fc	G. L.	SC	CM	Fc
Sulfato				Fosfato				
Sulfato	4	7.821	1.955	195.5**	4	0.003	0.001	10.0**
Fosfato	4	11.894	2.974	297.4**	4	136.317	34.079	340790.0**
Sulf. x Fos.	16	5.033	0.315	31.5**	16	0.017	0.001	10.0**
Error	50	0.520	0.010		50	0.005	0.0001	
Total	74	25.268			74	136.342		
$\bar{X} = 0.485$					$\bar{X} = 1.935$			
C. V. = 22.68%					C. V. = 0.50%			
<u>Suelo No. 5</u>								
Sulfato	4	1.871	0.468	119.4**	4	2.000	0.5000	96.5**
Fosfato	4	3.938	0.985	251.3**	4	67.087	16.772	3237.8**
Sulf. x Fos.	16	4.957	0.310	79.1**	16	4.272	0.267	51.5**
Error	50	0.196	0.004		50	0.259	0.005	
Total	74	10.962			74	73.618		
$\bar{X} = 0.324$					$\bar{X} = 1.425$			
C. V. = 19.52%					C. V. = 4.96%			
<u>Suelo No. 10</u>								
Sulfato	4	0.998	0.250	49.2**	4	0.239	0.060	14.5**
Fosfato	4	2.831	0.708	139.4**	4	55.316	13.829	3340.3**
Sulf. x Fos.	16	1.463	0.091	17.9**	16	0.716	0.045	10.9**
Error	50	0.254	0.005		50	0.207	0.004	
Total	74	5.546			74	56.478		
$\bar{X} = 0.271$					$\bar{X} = 1.392$			
C. V. = 26.09%					C. V. = 4.54%			
<u>Suelo No. 14</u>								
Sulfato	4	14.004	3.501	540.3**	4	0.002	0.0005	3.57*
Fosfato	4	13.278	3.320	512.3**	4	131.420	32.855	234678.6**
Sulf. x Fos.	16	5.036	0.315	48.6**	16	0.006	0.0004	2.86
Error	50	0.324	0.006		50	0.007	0.00014	
Total	74	32.642			74	131.435		
$\bar{X} = 0.558$					$\bar{X} = 1.900$			
C. V. = 13.88%					C. V. = 0.62%			

Cuadro 2 (Continuación)

F. V.	G. L.	SC	CM	F _c	G. L.	SC	CM	F _c
Sulfato				Fosfato				
<u>Suelo No. 15</u>								
Sulfato	4	2.131	0.533	119.5**	4	0.317	0.079	116.2*
Fosfato 4	4	2.856	0.714	160.1**	4	94.730	23.682	34836.5**
Sulf. x Fosf.	16	2.262	0.141	31.6**	16	1.118	0.118	173.5**
Error	50	0.223	0.004		50	0.034	0.0007	
Total	74	7.472			74	96.963		
$\bar{X} = 0.394$				$\bar{X} = 1.676$				
C. V. = 16.05%				C. V. = 1.58%				
<u>Suelo No. 17</u>								
Sulfato	4	10.826	2.707	244.4**	4	0.016	0.004	1.6
Fosfato	4	7.932	1.983	181.3**	4	101.724	25.431	10254.4**
Sulfato	16	3.675	0.230	21.0**	16	0.146	0.009	3.6**
Error	50	0.547	0.011		50	0.124	0.002	
Total	74	22.980			74	102.010		
$\bar{X} = 0.500$				$\bar{X} = 1.700$				
C. V. = 20.98%				C. V. = 2.63 %				
<u>Suelo No. 19</u>								
Sulfato	4	2.897	0.724	45.5**	4	0.015	0.004	2.89 *
Fosfato	4	4.791	1.198	75.3**	4	117.129	29.282	21218.8**
Sulf. x Fosf.	16	3.128	0.195	12.2**	16	0.038	0.002	1.44
Error	50	0.796	0.016		50	0.069	0.001	
Total	74	11.612			74	117.251		
$\bar{X} = 0.349$				$\bar{X} = 1.796$				
C. V. = 36.24%				C. V. = 1.76%				
<u>Suelo No. 21</u>								
Sulfato	4	2.281	0.570	54.4**	4	0.034	0.009	0.93
Fosfato	4	4.641	1.160	110.7**	4	69.756	17.439	1855.2**
Sulf. x Fosf.	16	2.349	0.147	14.0**	16	0.315	0.020	2.1
Error	50	0.524	0.010		50	0.470	0.009	
Total	74	0.795			74	70.575		
$\bar{X} = 0.281$				$\bar{X} = 1.524$				
C. V. = 35.59				C. V. = 6.22%				

Cuadro 2. (Continuación)

F. V.	G. L.	SC	CM	F _c	G. L.	SC	CM	F _c
<u>Suelo No. 23</u>								
Sulfato	4	6.059	1.515	129.7**	4	0.002	0.0004	10.0**
Fosfato	4	7.654	1.913	163.8**	4	92.556	23.139	578475.0**
Sulf. x Fosf.	16	2.700	0.169	14.5	16	0.011	0.001	25.0**
Error	50	0.584	0.012		50	0.002	0.00004	
Total	74	16.997			74	92.571		
$\bar{X} = 0372$				$\bar{X} = 1.574$				
C. V. = 29.44%				C. V. = 0.40%				
<u>Suelo No. 26</u>								
Sulfato	4	1.302	0.325	80.0**	4	0.199	0.050	11.7**
Fosfato	4	3.370	0.842	207.4**	4	58.068	14.517	3407.7**
Sulf. x Fosf.	16	2.617	0.164	40.4**	16	0.497	0.031	7.3 **
Error	50	0.203	0.004		50	0.213		
Total	74	7.492			74	58.977		
<u>Suelo No. 27</u>								
Sulfato	4	10.288	2.572	201.6**	4	0.026	0.006	5.17**
Fosfato	4	3.744	0.936	73.4**	4	107.611	26.910	23198.3.3**
Sulf. x Fosf.	16	3.169	0.198	15.5**	16	0.055	0.003	2.59**
Error	50	0.638	0.013		50	0.058	0.003	
Total	74	17.839			74	107.780		
$\bar{X} = 0.477$				$\bar{X} = 1.735$				
C. V. = 23.90%				C. V. = 1.82%				

Cuadro 3. Análisis de variancia de la retención de sulfatos y fosfatos de los 11 suelos del estudio de la relación fosfato-sulfato.

F.V.	G.L.	SC	CM	Fc
Sulfatos				
Repetición	2	0.013	0.0065	0.75
Sulfato	4	45.629	11.4073	1311.64**
Fosfato	4	59.916	14.9790	1722.32**
Suelos	10	9.300	0.9300	106.93**
Suelos x Sulfato	40	13.696	0.3424	39.37**
Suelos x fosfato	40	6.386	0.1597	18.36**
sulfato x fosfato	16	23.631	1.4769	169.82**
Suelo x Sulfato x fosfato	160	9.579	0.0599	6.89**
Error	548	4.766	0.0089	
Total	824	172.943		
$\bar{X} = 0.386$	C.V. = 24.16%			
Fosfatos				
Repetición	2	0.009	0.004	0.84
Sulfato	4	0.295	0.074	15.61**
Fosfato	4	1005.176	251.294	53006.67**
Suelos	10	26.063	2.606	549.70**
Suelos x Sulfato	40	0.850	0.021	4.43**
Suelos x Fosfato	40	26.791	0.670	141.33**
Suelos x Sulfato x Fosfato	160	3.154	0.020	4.22**
Error	548	2.598	0.0047	
Total	824	1064.936		
$\bar{X} = 1.643$	C.V. = 4.17%			