

COLECCION
PUNTO
VERDE
No.5

INIA
Instituto de Investigaciones
REGIONAL

EL AZUFRE

su importancia
como nutriente
en la agricultura tropical

Monómeros Colombo Venezolanos S. A. (E.M.A.)

REG.4

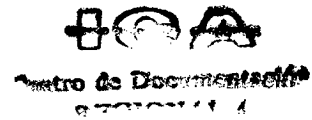
COL

1297

394

25397

Reg 25397



EL AZUFRE

**su importancia
como nutriente
en la agricultura tropical**

MONOMEROS COLOMBO VENEZOLANOS S. A. (E.M.A.)
COLECCION PUNTO●VERDE
No. 5
Departamento de Mercadeo, 1986

01.857

2cop.

Contenido

	Pág.
INDICE DE TABLAS	4
INDICE DE FIGURAS	5
1. INTRODUCCION	7
2. EL AZUFRE EN LA PLANTA	9
2.1 Funciones en la Planta	9
2.2 Síntomas de Deficiencia	10
3. EL AZUFRE EN EL SUELO	13
3.1 Contenido Total de Azufre en el Suelo	13
3.2 Fuentes de Azufre	13
3.3 Formas de Azufre en el Suelo	14
3.3.1 Azufre Orgánico	14
3.3.2 Azufre Inorgánico	15
3.4 Procesos Dinámicos del Azufre en el Suelo	15
3.4.1 Mineralización del Azufre Orgánico	15
3.4.2 Inmovilización del Azufre en el Suelo	17
3.4.3 Procesos de Oxidación y Reducción	18
3.4.4 Adsorción de Sulfatos por el Suelo	19
3.5 Deficiencia de Azufre en Suelos del trópico	20
3.5.1 Remoción de Azufre por las Cosechas	20
3.5.2 Uso y Manejo de los Fertilizantes	20
3.5.3 Pérdidas de Azufre por Erosión y Lavado	22
3.5.4 Pérdidas de Azufre por Volatilización	22
4. DIAGNOSTICO DE LAS DEFICIENCIAS DE AZUFRE	23
4.1 Análisis de Suelo	23
4.1.1 Métodos de Extracción y Determinación del Azufre en el Suelo	23
4.1.2 Niveles Críticos en el Suelo	24
4.2 Análisis de Tejido Vegetal	24
4.2.1 Criterios de Diagnóstico	24
4.2.2 Niveles Críticos en las Plantas	25
5. RESPUESTA DE ALGUNOS CULTIVOS A LA APLICACION DE AZUFRE	27
6. FERTILIZANTES UTILIZADOS COMO FUENTES DE AZUFRE	31
6.1 Sulfato de Amonio	31
6.2 Superfosfato Simple	32
6.3 Sulfato de Potasio	32
6.4 Sulfato Doble de Potasio y Magnesio	32
6.5 Yeso	32
6.6 Azufre Elemental	32
6.7 Urea Recubierta con Azufre	32
6.8 Urea-Acido Sulfúrico	32
7. INVESTIGACIONES SOBRE AZUFRE EN COLOMBIA	33
8. EL AZUFRE EN LA RECUPERACION DE SUELOS SODICOS Y SALINO-SODICOS	39
8.1 Definición y Características de los Suelos Sódicos y Salino-Sódicos	39
8.2 Recuperación de Suelos Sódicos y Salino-Sódicos	39
9. CONCLUSIONES	41
10. BIBLIOGRAFIA	41

INDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Efecto del Azufre en el contenido de Clorofila en el trébol rojo	10
2. Contenido de Azufre en algunos suelos de América Latina.	13
3. Cantidades de nitrógeno, fósforo y azufre extraídas por algunos cultivos en el Brasil	21
4. Niveles críticos de Azufre en el suelo para algunos cultivos	24
5. Niveles críticos de Azufre en la planta para varios cultivos.	25
6. Respuesta de algunos cultivos a la aplicación de Azufre en el Brasil.	27
7. Efecto de la deficiencia severa de Azufre en la producción de arroz y en el número de panículas.	28
8. Efecto de la dosis de Azufre en la producción de arroz y en el contenido de Azufre, en un suelo de la Amazonía del Brasil	28
9. Efecto del Azufre en el rendimiento y composición del Pasto Orchoro.	29
10. Contenido de varios fertilizantes en Azufre y otros elementos nutritivos	31
11. Contenido de Azufre en algunos suelos de Colombia	33
12. Respuesta del Sorgo a la fertilización con Azufre en suelos de los Llanos Orientales	34
13. Coeficientes de correlación (r) entre el Azufre extraído por dos métodos y la absorción y concentración de Azufre en la planta.	35
14. Producción de forraje seco de la mezcla de ryegrass y trébol blanco en diferentes aplicaciones de Azufre en la Sabana de Bogotá.	35
15. Cantidades de yeso y Azufre necesarias para substituir las cantidades indicadas de Sodio intercambiable	40

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Procesos metabólicos del Azufre en la planta	9
2. Relación entre el contenido de C orgánico y S total en algunos suelos del Brasil.	14
3. Relación entre el contenido total de Nitrógeno y el contenido total de Azufre en algunos suelos de Africa Tropical.	14
4. Relación entre el Azufre orgánico y Nitrógeno total en algunos suelos de Colombia	15
5. Ciclo del Azufre en la naturaleza	16
6. Mineralización del Azufre y del Nitrógeno a través del tiempo	16
7. Efecto de la temperatura en la mineralización del Azufre	16
8. Efecto de la humedad del suelo en la mineralización del Azufre	16
9. Principales transformaciones biológicas del Azufre en el suelo	17
10. Relación entre la oxidación del Azufre y la temperatura en pruebas de incubación	18
11. Efecto de la remoción de materia orgánica y hierro en la absorción de $SO_4^{=}$	19
12. Efecto del pH y de la concentración de $SO_4^{=}$ en la adsorción de sulfatos por el suelo	19
13. Efecto de la concentración de fosfatos en la adsorción de sulfatos.	22
14. Relación entre la época de aplicación del Azufre al suelo y el rendimiento del arroz.	28
15. Efecto de fuentes de Azufre en la producción de pasto guinea en el Brasil	29
16. Efectos del Azufre en el rendimiento del café en el Brasil	29
17. Eficacia de dos fertilizantes en la aplicación de Azufre en suelos de los Llanos Orientales	34
18. Influencia del Azufre en la concentración del mismo en las plantas de ryegrass, en suelos de los Llanos Orientales	34
19. Efecto de la fertilización con yeso sobre el rendimiento de materia seca de maíz en algunos suelos del Huila.	36
20. Efecto de la fertilización con yeso sobre la absorción de Azufre por plantas de maíz, en algunos suelos del Huila.	36
21. Efecto de la fertilización con Azufre del algodón en Chicoral (Tolima) y Tuluá (Valle del Cauca).	37

22.	Respuesta de algunos cultivos a las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados y Azufre en Colombia y otros países	37
23.	Respuesta del pasto pangola a la fertilización nitrogenada con Urea y Sulfato de Amonio. Promedio de 25 cortes	38

1. Introducción

El azufre es uno de los nutrimentos secundarios esenciales en la nutrición vegetal y es requerido por los cultivos en cantidades aproximadamente iguales a las del fósforo (Blair, 1979). No obstante su importancia, el azufre ha recibido poca atención en los programas de investigación, los cuales se han enfocado principalmente, hacia el estudio de otros nutrimentos como el nitrógeno, el fósforo y el potasio. Este hecho se explica, en parte, por el uso de fertilizantes fosforados y nitrogenados portadores de azufre, que han contribuído a suplir la deficiencia de este nutrimento en el suelo.

En la actualidad en las zonas tropicales el área agrícola con deficiencia de azufre está aumentando lo cual hace necesario que se conceda un mayor auge a la investigación sobre dicho nutrimento. El aumento de las deficiencias de azufre en el trópico es consecuencia de su bajo contenido en el suelo y de la disminución del uso de fertilizantes nitrogenados y fosforados que contienen azufre, los cuales están siendo substituídos por fuentes de mayor concentración de nitrógeno y fósforo pero que no contienen azufre (Blair, 1979).

En un estudio sobre el azufre en los trópicos Blair (1979) manifiesta que se han obtenido respuestas positivas a las aplicaciones de azufre en 40 países tropicales con 23 cultivos diferentes lo cual puede ser un indicativo de la magnitud del problema.

En Colombia el azufre ha sido un nutrimento poco estudiado y en consecuencia hace falta información en lo referente a zonas con deficiencia, respuesta de los cultivos a la fertilización con azufre y otros aspectos importantes del mismo en su relación con el suelo y con la planta. Por lo anterior, el azufre generalmente no se incluye en las prácticas de fertilización.

La presente publicación tiene como objetivo principal presentar aspectos básicos sobre el azufre en lo referente a su dinámica en el suelo y en la planta y a sus implicaciones en la agricultura, de tal forma que los profesionales vinculados con el sector agropecuario puedan tener un conocimiento más claro de este nutrimento.

Monómeros Colombo Venezolanos S. A. (E.M.A.)

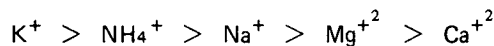


2. El azufre en la planta

El azufre es un nutriente importante no sólo en la producción de las cosechas, sino también en la calidad de las mismas ya que es constituyente de algunos aminoácidos. Algunas plantas lo requieren en cantidades similares a las del fósforo y otras en cantidades superiores (Tisdale y Platou, 1981). La concentración del azufre en las plantas es aproximadamente 0.25% (Blair, 1979).

2.1 Funciones en la Planta

El azufre es absorbido por las raíces de las plantas casi exclusivamente como SO_4^{2-} (Devlin, 1970). Además, las plantas lo pueden tomar por difusión gaseosa a través de las hojas en forma de SO_2 ; sin embargo, concentraciones relativamente altas de SO_2 en la atmósfera causan fitotoxicidad (Faller, 1971). La absorción de SO_4^{2-} parece ser disminuida por la presencia de iones Cl en el suelo; los altos niveles de selenio existentes en algunos suelos pueden inducir deficiencias de azufre (Malavolta, 1982). Según Simón - Silvestre citado por Malavolta (1982), la velocidad de la absorción de los iones sulfato depende del catión acompañante y obedece a la siguiente secuencia:



Una vez absorbido el azufre interviene en diferentes procesos en la planta, los cuales se muestran en la Figura 1. De acuerdo con Devlin (1970) el sulfato luego de absorbido es reducido, pasando por un estado activado en el cual interviene el 3' - fosfoadenosina - 5 - fosfosulfato (PAPS) y el ATP. El PAPS es sintetizado en dos pasos; inicialmente ocurre una activación del sulfato mediante ATP y la enzima sulfurilasa para formar adenosin - S - fosfosulfato (APS); posteriormente el APS se convierte en PAPS mediante la acción de una quinasa específica. El esquema de la reacción según el autor citado es el siguiente:



El azufre en forma reducida termina formando parte de los aminoácidos cistina, cisteína y metionina, los cuales son componentes esenciales de las proteínas y contienen

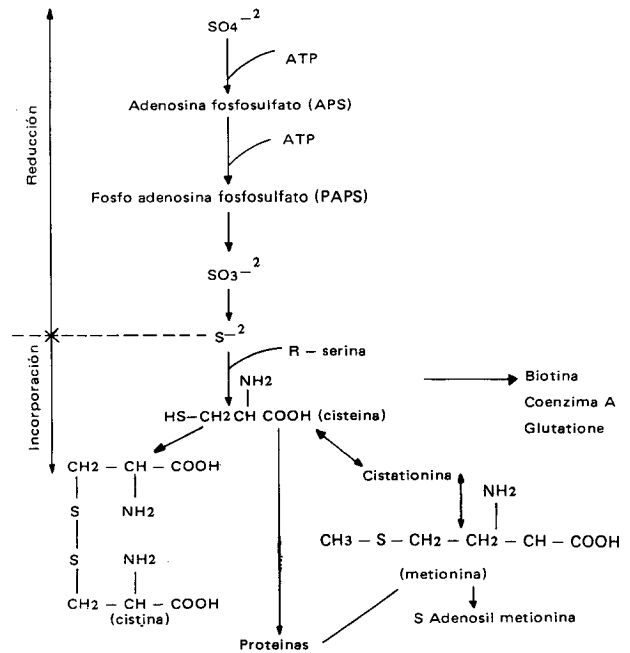


Figura 1. Procesos metabólicos del Azufre en la planta (Malavolta, 1982)

aproximadamente el 90% del azufre encontrado en las plantas.

El azufre también es constituyente de vitaminas como la biotina y la tiamina, al igual que de la coenzima - A; de este modo su función va ligada en parte a las actividades metabólicas de tales compuestos.

De acuerdo con Allway y Thompson (1966) las funciones que el azufre desempeña en la planta se pueden agrupar en dos categorías a saber: estructurales y metabólicas. Las estructurales hacen referencia al papel del azufre en la estructura de las proteínas al establecer puentes mediante enlaces covalentes, los cuales ayudan a los enlaces peptídicos y a los puentes de hidrógeno a estabilizar la estructura de la proteína. Por otra parte, los grupos sulfhidrilo (SH) constituyen sitios a los cuales se unen cationes metálicos pudiéndose formar cadenas protéicas alrededor del metal.

Las funciones metabólicas del azufre son debidas a la acción de los aminoácidos de las proteínas, a los aminoácidos libres y a otros compuestos de azufre de bajo peso molecular. El azufre actúa a través de los grupos sulfhidrilo que se encuentran en muchas enzimas y que constituyen el punto de unión del sustrato con la enzima. También interviene en los procesos fotosintéticos y en las reacciones de descarboxilación por intermedio de la biotina.

Debido a la participación del azufre en diferentes reacciones y procesos en la planta, su deficiencia provoca varios desórdenes metabólicos, entre los cuales se destacan: disminución de la síntesis de proteínas, presencia de altas relaciones nitrógeno soluble/nitrógeno protéico, disminución de la fijación del nitrógeno, y decrecimiento en la actividad respiratoria y en el proceso de fotosíntesis. En la Tabla 1 se presente el efecto de las aplicaciones de azufre en el contenido de clorofila en el trébol rojo. Como se puede observar, el contenido de clorofila aumenta por acción del azufre agregado; este incremento llega al 140% cuando hay cantidades adecuadas de azufre.

2.2 Síntomas de Deficiencia en la Planta

Las plantas que padecen una grave deficiencia de azufre muestran una serie de síntomas bastante característicos como en el caso de las deficiencias de otros nutrimentos. No obstante, los síntomas de deficiencia de azufre no siempre son fácilmente distinguibles y pueden con frecuencia confundirse con los del nitrógeno. En algunos casos menos severos los síntomas visuales de la deficiencia de azufre pueden pasar inadvertidos; sin embargo, el rendimiento y la calidad de las cosechas, son severamente afectados (Platou e Irish, 1982).

Tabla 1. Efecto del Azufre en el contenido de Clorofila en el trébol rojo. (Tisdale y Platou, 1981)

Sulfato Aplicado ppm S	Contenido de Clorofila %
0	0.49
5	0.54
10	0.50
20	1.02
40	1.18

Devlin (1970) indica que las plantas deficientes en nitrógeno, al igual que las deficientes en azufre, presentan una clorosis general seguida en algunas especies por la producción de compuestos antocianínicos. A diferencia de la deficiencia en nitrógeno, las plantas carentes de azufre presentan la clorosis empezando por las hojas más jóvenes lo cual es consecuencia de la diferencia en el proceso de traslocación ya que el nitrógeno es fácilmente translocado dentro de la planta lo que no ocurre con el azufre. Sin embargo, en condiciones de deficiencia severa todas las hojas pueden sufrir una pérdida de color verde.

Eaton, citado por Devlin (1970), en diferentes estudios con plantas de tomate, girasol y soya, encontró que en condiciones de deficiencia de azufre se acumulaba en los tejidos almidón, sacarosa y nitrógeno soluble, mientras que los azúcares reductores se encontraban en cantidad inferior a la normal. Eaton propuso la hipótesis de que el aumento del nitrógeno soluble podía ser debido a la inhibición de la síntesis protéica, seguida de un aumento en la actividad proteolítica.

En forma general, Platou e Irish (1982) señalan como síntomas de deficiencia de azufre los siguientes:

- Plantas pequeñas y fusiformes con tallos cortos y delgados.
- Desarrollo tardío y madurez frecuentemente retrasada, especialmente en los cereales para grano.
- En la mayoría de las plantas el color de las hojas jóvenes varía desde verde claro hasta amarillento con nervaduras aún más claras. Sin embargo, en otras plantas tales como el tabaco, los cítricos y el algodón, puede darse el caso de que algunas hojas viejas se vean afectadas primero. Este amarillamiento de las hojas, se confunde frecuentemente con una deficiencia de nitrógeno. En el sorgo y en el maíz, los primeros síntomas pueden confundirse también con los presentados por las deficiencias de hierro y zinc.
- En las leguminosas, frecuentemente se reduce la formación de nódulos.
- Los frutos, muchas veces, no llegan a madurar totalmente y presentan un color verde claro. Pueden aparecer manchas en las hojas, como ocurre en las patatas.

En las fotografías adjuntas se muestran los síntomas de deficiencia de azufre en algunos cultivos.



SINTOMAS VISUALES DE DEFICIENCIA DE AZUFRE EN ALGUNAS ESPECIES CULTIVADAS*

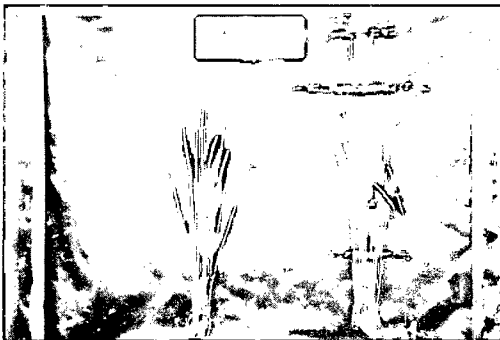
SORGO



TOMATE



ARROZ



SOYA



TABACO



ALFALFA



MANI



*Por cortesía del Centro de Investigación y Promoción del Sulfato de Amonio, Sao Paulo, Brazil.

3. El azufre en el suelo

El azufre en el suelo, es sometido a diferentes procesos dinámicos que condicionan las cantidades de las formas disponibles para la planta.

3.1 Contenido total de Azufre en el suelo

El contenido de azufre en los suelos minerales varía entre 0.02 y 0.2% . Los suelos orgánicos presentan a veces contenidos hasta del 1% de azufre (Fassbender, 1980). En las regiones templadas el contenido de azufre disminuye al aumentar el grado de evolución del suelo (Blair, 1979).

Según Beaton y Burns (1968) el contenido del azufre total del suelo indica la reserva de este elemento que puede ser convertida por acción química o bacteriana a formas aprovechables por las plantas.

En la Tabla 2 se presenta el contenido de azufre en algunos suelos latinoamericanos.

Como se observa existe gran variación en el contenido total de azufre; los mayores valores se presentan en suelos de Costa Rica, lo cual puede atribuirse en parte a los materiales parentales que originaron dichos suelos y que son materiales volcánicos ricos en azufre.

Por su parte, los suelos del Brasil presentan bajos contenidos de azufre total, hecho que, según Malavolta (1984), se debe a los contenidos bajos de materia orgánica, a las quemaduras que producen pérdidas de azufre por volatilización y a la translocación de azufre dentro del perfil de suelo por acción del agua.

De acuerdo con Blair (1979) las principales diferencias entre la zona templada y la zona tropical con respecto al contenido de azufre en el suelo, son las siguientes:

En los trópicos el contenido de azufre adsorbido es generalmente alto; en este estado el azufre no puede ser lavado del perfil. Por otra parte, las formas orgánicas del azufre, las cuales se consideran como una reserva, se encuentran por lo general en bajos contenidos. Las condiciones ambientales de los trópicos hacen que se produzca una mayor tasa de mineralización de la materia orgánica y por consiguiente del azufre orgánico. Como excepciones a esta norma están los suelos derivados de cenizas volcánicas, (Andepts) en los cuales la formación de complejos alófano-humus contribuye a retrasar el proceso de mineralización.

3.2 Fuentes de Azufre

La corteza terrestre contiene aproximadamente un 0.06% de azufre, el cual se encuentra en forma de sulfuros, sulfatos y combinaciones orgánicas con el carbono y con el nitrógeno (Tisdale y Nelson, 1975).

Las fuentes originales de azufre del suelo son los sulfuros metálicos entre los cuales los más importantes son: La Pirita (FeS_2), calcopirita ($Cu Fe S_2$), galena (PbS) y blenda ($Zn S$), (Garavito, 1979). Estos sulfuros se encuentran en las rocas plutónicas, en ellas los minerales se alteran por los procesos del intemperismo y el azufre es oxidado quedando libre en forma de sulfato. Los sulfatos pueden ser precipitados en formas solubles o insolubles en condiciones de climas áridos o semiáridos; pue-

Tabla 2. Contenido de Azufre en algunos suelos de América Latina.

Suelos y Localización	Contenido de S en ppm		Referencia
	S – Total	S – Orgánico	
Costa Rica: Volcánicos	2.606	282	Fassbender (1980)
Lateríticos	2.391	141	Fassbender (1980)
Aluviales	1.940	354	Fassbender (1980)
Brasil:	166	–	Neptune et. al (1975)
Nicaragua: Volcánicos	879	214	Burbano (1973)

den ser tomados por los microorganismos y plantas superiores para su nutrición o reducidos por otros microorganismos a sulfuros o azufre elemental en condiciones anaeróbicas; otra parte puede ser transportada por las aguas de drenaje (Tisdale y Nelson, 1975).

Otras fuentes de azufre son las emanaciones volcánicas de azufre elemental, anhídrido sulfuroso (SO_2) y ácido sulfhídrico; los depósitos de yeso especialmente en regiones áridas y el carbón mineral el cual tiene en promedio 1.5% de azufre ya sea en forma orgánica o como piritita (Garavito, 1979).

Además de las fuentes anteriores, son importantes los aportes de azufre que hace la atmósfera al suelo. Como se sabe, el dióxido de azufre (SO_2) de la atmósfera es transportado por la lluvia y constituye así, otra fuente importante de azufre para las plantas. De acuerdo con Faller (1971) el suelo adsorbe SO_2 del aire que luego de ser oxidado queda en forma disponible para las plantas.

3.3 Formas del Azufre en el suelo

El azufre en el suelo se encuentra en formas orgánicas e inorgánicas. La proporción relativa de cada una de ellas depende del clima y de las propiedades de los suelos. Por lo general, en zonas áridas predominan los sulfatos precipitados con el calcio, magnesio, sodio y potasio; mientras en climas húmedos las formas orgánicas adquieren mayor importancia (Tisdale y Nelson, 1975).

3.3.1 Azufre Orgánico

El azufre orgánico proviene de los residuos animales o vegetales caídos al suelo. De acuerdo con Davin, citado por Blair (1979), en algunos suelos tropicales una gran porción del azufre está asociado con la materia orgánica. Como el nitrógeno, el carbono y el azufre son constituyentes esenciales de la materia orgánica se han encontrado relaciones específicas como las que se muestran en las Figuras 2, 3 y 4 que corresponden a suelos del Brasil, del Africa Tropical y de varias regiones de Colombia, respectivamente. Las formas orgánicas del azufre no son directamente disponibles para la planta, pero por procesos de mineralización pueden pasar a serlo; por lo tanto constituyen una reserva de azufre.

En el suelo se distinguen dos fracciones de azufre orgánico: el azufre ligado directamente al carbono y el azufre reducible con ácido iodhídrico (Freney, 1962).

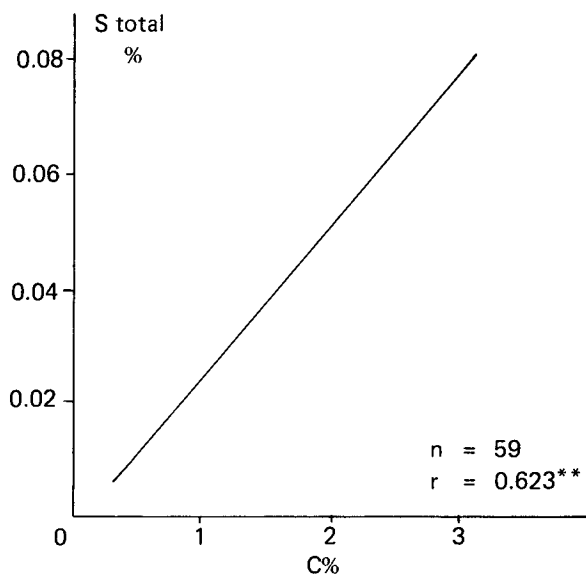


Figura 2. Relación entre el contenido de Carbono orgánico y Azufre total en algunos suelos del Brasil. (Neptune, et. al., 1975)

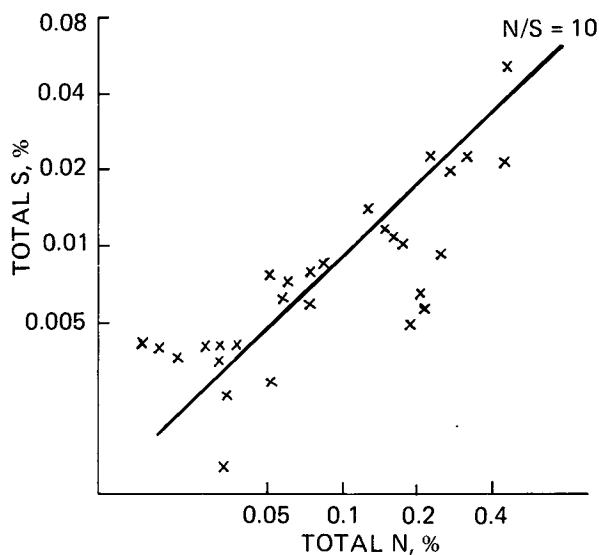


Figura 3. Relación entre el contenido total de Nitrógeno y el contenido total de Azufre en algunos suelos de Africa Tropical. (Dabin, 1972, citado por Blair, 1979)

La primera fracción se refiere al azufre que constituye los aminoácidos cistina, cisteína y metionina, el cual puede representar en promedio un 30% del azufre orgánico total del suelo (Freney, et. al. 1972). En suelos de Australia se ha encontrado que esta forma de azufre representa hasta un 64% del azufre orgánico (Freney y

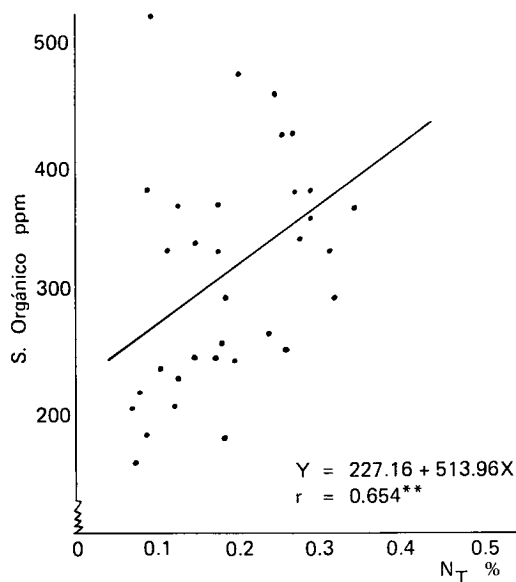


Figura 4. Relación entre el S orgánico y el N total en algunos suelos de Colombia. (Martínez, 1983)

Melville, 1971); mientras en suelos del Brasil sólo se han encontrado valores que varían entre 5 y 12% (Neptune et. al., 1975). En Colombia se han encontrado valores de 61% por Gómez (1981), en suelos del departamento del Huila.

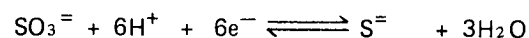
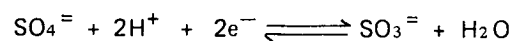
El azufre unido directamente al carbono puede mineralizarse por acción microbiológica, pasando a constituir sulfatos.

La segunda fracción está integrada por los sulfatos orgánicos que presentan el enlace C—O—S (sulfato - ésteres); o C — N — S, tales como sulfatos fenólicos, sulfato - ésteres de carbonhidratos y lípidos y sulfatos de colina. Esta fracción se define como aquella que se reduce a ácido sulfhídrico por medio de una mezcla de ácido iodhídrico y álcali (Freney, 1962). Neptune y colaboradores (1975) en un grupo de suelos del Brasil, encontraron que los sulfato-ésteres constituían entre el 20 y 50% del azufre total; mientras en suelos de Iowa los contenidos oscilaban entre 50 y 62%. Según Williams, citado por Blair (1979), en una amplia variedad de suelos de la zona templada, el contenido de sulfatos-ésteres representa entre el 30 y el 70% del azufre total. En el departamento del Huila se encontró que el 36% del azufre total del suelo estaba constituido por azufre unido al carbono, (Gómez, 1981). Esta fracción de azufre no es directamente disponible para las plantas, ya que se necesi-

ta primero romper el enlace de éster para que el sulfato sea liberado y la planta lo pueda absorber. Sin embargo, el secado de los suelos produce rompimiento de dicho enlace, lo cual puede influir notablemente en los resultados de los análisis de laboratorio (Barrow, 1961).

3.3.2 Azufre Inorgánico

Las formas inorgánicas de azufre en el suelo son principalmente los sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$) y los sulfuros ($\text{S}^{=}$). El predominio de una de estas formas, depende del potencial de óxido-reducción, según se aprecia en las siguientes ecuaciones (Garavito, 1979).



En condiciones de buen drenaje predominan los iones sulfatos combinados con cationes como calcio, magnesio, potasio, sodio o amonio en la solución del suelo; pueden estar también precipitados como sales de esos elementos en climas áridos; o se pueden encontrar adsorbidos por arcillas de relación 1:1 y por óxidos de hierro y de aluminio. Por el contrario, los sulfuros son frecuentes en condiciones de mal drenaje en las cuales se pueden encontrar ciertas cantidades de azufre en forma elemental (Tisdale y Nelson, 1975). Según Fassbender (1980), el azufre que se encuentra adsorbido constituye una reserva de dicho nutrimento para la planta. El azufre de la solución del suelo permanece en equilibrio químico con la fracción adsorbida; en esta forma, cuando las plantas absorben el azufre de la solución, o cuando éste se pierde por lavado, se produce una reposición a partir del azufre adsorbido. Igualmente, al disolverse los fertilizantes sulfatados en la solución del suelo, parte del azufre pasa al complejo de cambio donde es almacenado.

3.4 Procesos Dinámicos del Azufre en el Suelo

Las reacciones del azufre en el suelo son complejas debido a sus varios estados de oxidación ya que se encuentra tanto en forma orgánica como inorgánica (Garavito, 1979). En la Figura 5, se esquematiza el ciclo del azufre que resume el gran número de transformaciones que sufre dicho elemento. A continuación se discuten aspectos importantes de este ciclo.

3.4.1 Mineralización del Azufre Orgánico

La mineralización del azufre es el proceso mediante el cual las formas orgánicas de azufre se transforman en

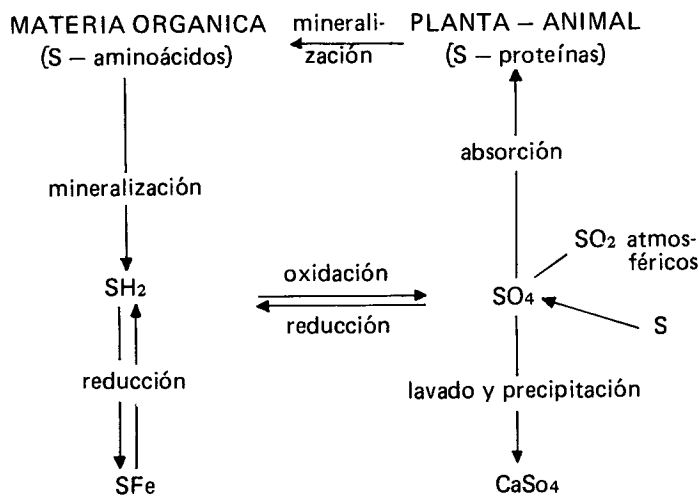


Figura 5. Ciclo del Azufre en la naturaleza. (Fassbender, 1980)

formas inorgánicas como respuesta a diferentes acciones químicas o biológicas. La mineralización es normalmente medida como la producción neta de sulfatos luego de un experimento de incubación, o también por la extracción de azufre efectuada por las plantas en un medio donde la mayor fuente de azufre está en forma orgánica. Como la inmovilización ocurre simultáneamente a la mineralización, la mineralización real es generalmente mayor que los valores medidos en tales experimentos (Swift, 1985). La mayoría de experimentos de incubación muestran un patrón típico de la mineralización del azufre a través del tiempo. En la figura 6 se muestran algunas curvas típicas de la mineralización del azufre en las cuales se puede observar inicialmente una alta tasa de producción de sulfatos durante una o cuatro semanas dependiendo del suelo.

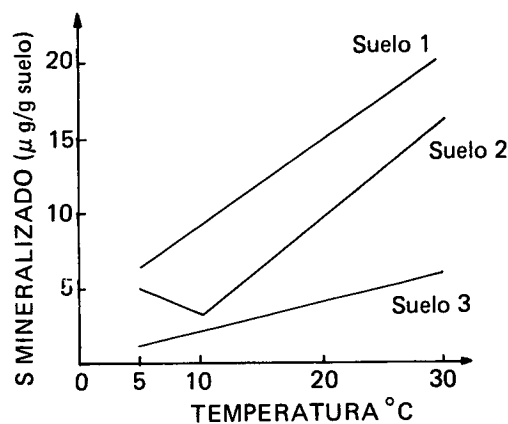


Figura 7. Efecto de la temperatura en la mineralización del Azufre. (Swift, 1985)

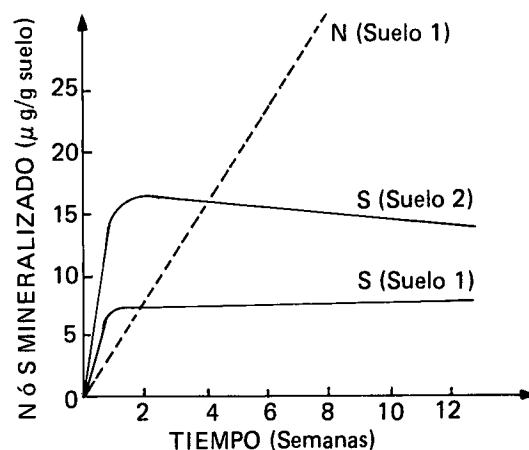


Figura 6. Mineralización del Azufre y del Nitrógeno a través del tiempo. (Williams, 1967)

Posteriormente el incremento en la tasa de mineralización del azufre es mucho menor. En la figura 6 también se compara la mineralización del azufre con la de el nitrógeno y puede observarse que existen considerables diferencias en el comportamiento de estos dos procesos a través del tiempo.

De acuerdo con Fassbender (1980) las proteínas, los péptidos y otros compuestos azufrados orgánicos son depolimerizados hasta aminoácidos tiosulfatos y tiourea. En un paso más adelante de este proceso el azufre de los aminoácidos puede ser reducido a ácido sulfhídrico u oxidado a iones sulfato. La bioquímica de estos procesos, tomando la cisteína como ejemplo, puede ser la siguiente según el autor anteriormente citado.

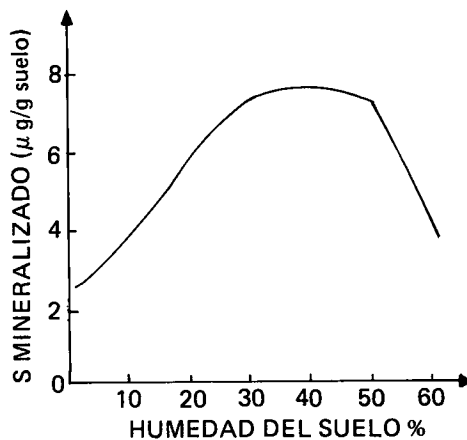
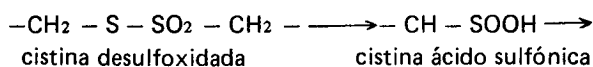
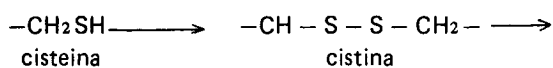
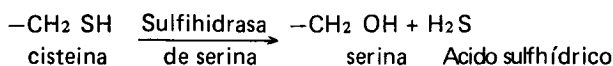


Figura 8. Efecto de la humedad en la mineralización del Azufre. (Williams, 1967)



La descomposici\u00f3n de la cisteina hasta H₂S ser\u00eda:



En estos procesos de mineralizaci\u00f3n intervienen diferentes microorganismos, como bacterias aer\u00f3bicas y anaer\u00f3bicas, heterotr\u00f3ficas, y adem\u00e1s algunos hongos (Fassbender, 1980). Se destacan las siguientes bacterias: *Proteus vulgaris*, *Serratia Marcescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Alcaligenes faecalis* y *Escherichi coli*; dentro de los hongos son importantes: *Scopulariopsis brevicaulis*, *Aspergillus sp.*, *Microsporium gypseum*.

El \u00e1cido sulfh\u00edrlico resultante es oxidado bajo condiciones de buena aireaci\u00f3n a SO₄⁼ y puede ser en esta forma absorbido por las plantas o inmovilizado por los microorganismos.

En el proceso de mineralizaci\u00f3n influyen diversos factores entre los cuales se tienen: temperatura, humedad del suelo, presencia de vegetaci\u00f3n, contenido de azufre en la materia org\u00e1nica, y aplicaci\u00f3n de cal al suelo, entre otros.

La figura 7 ilustra el efecto de la temperatura en la mineralizaci\u00f3n del azufre. En general la mineralizaci\u00f3n se incrementa al aumentar la temperatura; en algunos casos puede presentarse una disminuci\u00f3n a determinada temperatura, hecho que se debe probablemente al aumento en la inmovilizaci\u00f3n del azufre inorg\u00e1nico (Swift, 1985). De acuerdo con Williams (1967) la temperatura \u00f3ptima para el proceso de mineralizaci\u00f3n del azufre es de 40\u00b0C aproximadamente.

El efecto de la humedad del suelo sobre la mineralizaci\u00f3n del azufre, se presenta en la figura 8; como se puede observar, la tasa de producci\u00f3n de sulfatos es m\u00e1xima cuando el suelo presenta contenidos medios de humedad. En condiciones de saturaci\u00f3n es posible que se produzca mineralizaci\u00f3n, pero el azufre liberado no pasa a constituir sulfatos debido a las condiciones de reducci\u00f3n.

En diferentes investigaciones (Freney y Spencer, 1960) se ha encontrado que la mineralizaci\u00f3n del azufre es m\u00e1s intensa en suelos bajo vegetaci\u00f3n que en aquellas sin vegetaci\u00f3n. Presumiblemente esto ocurre debido a la acci\u00f3n de la gran cantidad de microorganismos presentes en la riz\u00f3sfera.

Stewart y colaboradores (1966) demostraron que la mineralizaci\u00f3n del azufre ocurr\u00eda solamente cuando el contenido de azufre en la materia org\u00e1nica era superior al 0.15%. Igualmente, influyen los contenidos de nitr\u00f3geno y carbono de la materia org\u00e1nica. Seg\u00fan Barrow, citado por Freney y colaboradores (1966), si la relaci\u00f3n C: S es inferior a 200, los sulfatos se acumulan en el suelo, si la relaci\u00f3n es superior se produce inmovilizaci\u00f3n del azufre.

Con respecto al efecto de la cal, Williams (1967) indica que en suelos \u00e1cidos la tasa de mineralizaci\u00f3n del azufre puede incrementarse por adici\u00f3n de cal al suelo, lo cual se debe probablemente a los cambios ocurridos en el pH y a otros efectos que indirectamente aumentan la actividad microbiol\u00f3gica.

3.4.2 Inmovilizaci\u00f3n del Azufre en el Suelo

Seg\u00fan Swift (1985), en diferentes investigaciones se ha encontrado que una gran cantidad del azufre agregado al suelo como sulfato, pasa a constituir formas org\u00e1nicas en per\u00edodos de tiempo que oscilan entre 2 y 24 semanas.

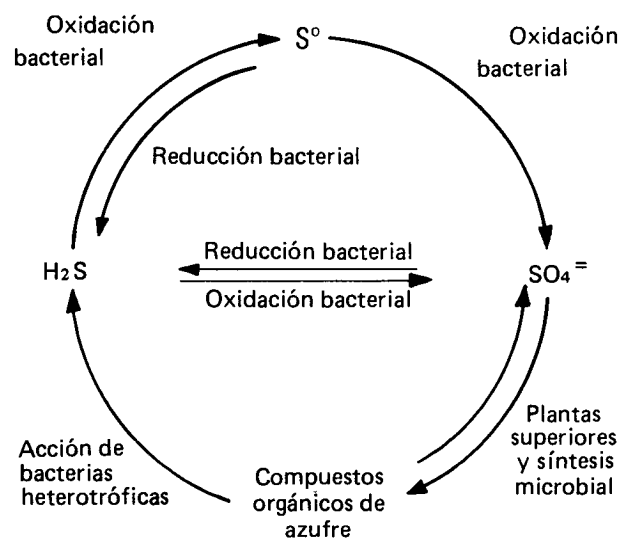


Figura 9. Principales transformaciones biol\u00f3gicas del S en el suelo. (Garavito, 1979)

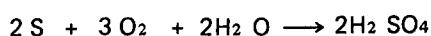
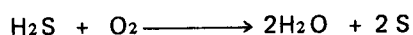
Anota el autor que la cantidad del azufre agregado que pasa a formas orgánicas varía entre 20 y 50% y tiende a incrementarse con el tiempo. Inicialmente este azufre pasa a conformar la fracción reducible con ácido iohídrico. La adición de materiales ricos en carbono o la presencia de materia orgánica metabolizable tienden a incrementar la cantidad de sulfato que es inmovilizado en formas orgánicas.

3.4.3 Procesos de Oxidación y Reducción

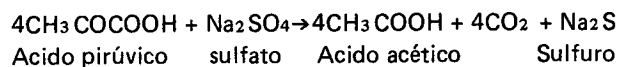
Los procesos de oxidación y reducción del azufre en los suelos son muy importantes en la dinámica de este nutriente y son realizados en su totalidad por microorganismos. En la figura 9 se esquematizan las principales transformaciones biológicas del azufre en el suelo. Estas reacciones son factibles porque el azufre puede actuar con diferentes valencias, entre +6 (sulfato) y -2 (sulfito), (Garavito, 1979).

Como resultado de la mineralización se producen en el suelo sulfatos, sulfuros, y además politionatos, tiocianatos y sulfitos, que pueden ser objeto de oxidación y reducción de acuerdo con las condiciones reinantes en el medio. (Fassbender, 1980).

En el proceso de oxidación del azufre intervienen bacterias del género *Thiobacillus*; las especies más comunes son (Tisdale y Nelson, 1975). *T. thiooxidans*, *T. thioparus*, *T. coparaliticus*, y *T. ferrooxidans*. Estos organismos son aeróbicos y autótrofos. Las reacciones químicas que ocurren se pueden representar así (Fassbender, 1980):



Bajo condiciones anaeróbicas los iones $\text{SO}_4^{=}$ no son estables y son reducidos a sulfuro ($\text{S}^{=}$). Los géneros de bacterias reductoras son *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum*. Las siguientes reacciones ilustran el proceso de reducción:



Según Fassbender (1980) el mecanismo exacto de la reducción del $\text{SO}_4^{=}$ no se conoce. Este proceso se produce de manera especial en suelos muy arcillosos y pesados o en suelos inundados como en el caso del cultivo del arroz.

El proceso de oxidación del azufre es afectado por algunos factores como la humedad del suelo y la temperatura. Al respecto, Tisdale y Nelson (1975) indican que la mayor tasa de oxidación ocurre cuando el suelo presenta un grado de humedad por debajo de la capacidad de campo. Contenidos de humedad superiores hacen que el proceso disminuya rápidamente debido al agotamiento del O_2 del suelo.

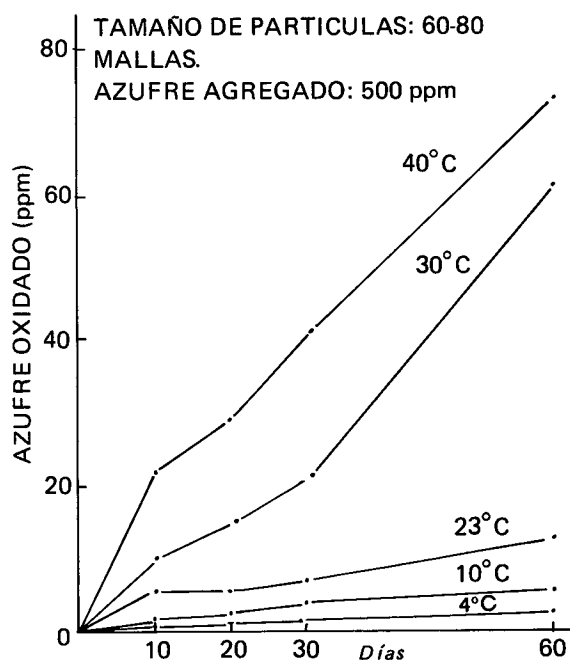


Figura 10. Relación entre la oxidación del Azufre y la temperatura en pruebas de incubación. (Li, 1965, citado por Blair, 1979)

En referencia al efecto de la temperatura en la oxidación del azufre, los mismo autores señalan que a 40°C se obtiene la máxima tasa de oxidación. Con el fin de ilustrar mejor dicho efecto se presenta la figura 10 donde se relaciona la tasa de oxidación del azufre agregado con el tiempo de incubación a diferentes temperaturas. Como se observa, la oxidación aumenta con el tiempo de incubación; pero a temperaturas superiores, a 30°C se obtienen las mayores cantidades de azufre oxidado. De acuerdo con Burns (1967) el pH del suelo no tiene efecto directo sobre la oxidación del azufre ya que la mayoría de los microorganismos responsables de dicho proceso se adaptan a valores de pH entre 2 y 9. El efecto depende del tipo de microorganismos involucrados; por ejemplo el pH óptimo para el *Thiobacillus thiooxidans* está entre 2 y 3.5; mientras que para el *T. novellus* es entre 8 y 9. En general la oxidación del azufre agregado es más rápida en suelos ácidos.

3.4.4 Adsorción de Sulfatos por el Suelo

Los coloides del complejo de cambio presentan algunas veces cargas positivas que originan procesos de intercambio aniónico. Bajo condiciones ácidas, generalmente por debajo del punto isoeléctrico de los minerales de arcilla y de los hidróxidos de hierro y de aluminio, se acumulan protones a los grupos $-OH$ ó NH_2 originándose cargas positivas. Estas cargas son compensadas por los aniones presentes en la solución del suelo, fenómeno denominado adsorción de aniones. (Fassbender, 1980).

La capacidad de adsorción de sulfatos por el suelo es variable y depende de algunos factores entre los cuales se tienen: la naturaleza y superficie activa de los óxidos, el contenido de arcilla, el tipo de arcilla, el pH del suelo y la presencia de otros aniones como el fosfato.

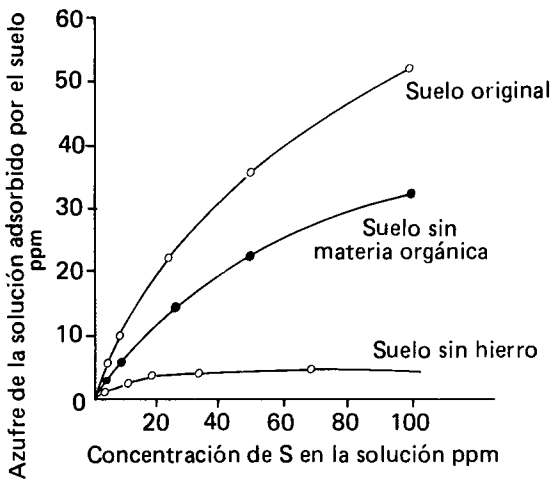


Figura 11. Efecto de la remoción de M.O. y Fe en adsorción de $SO_4^{=}$ (Chao et al, 1962)

En la figura 11 se muestra el efecto de la remoción de materia orgánica y hierro en la adsorción de sulfatos. La remoción de los óxidos de aluminio aunque no se muestra presentó efectos similares. Al analizar los resultados presentados se deduce que la remoción de óxidos de hierro, o de aluminio, al igual que la extracción de la materia orgánica reducen marcadamente la adsorción de sulfatos. Según Kamprath (1968), bajo condiciones ácidas estos óxidos desarrollan cargas positivas las cuales pueden retener aniones como el $SO_4^{=}$. Chang y Thomas (1963) propusieron un mecanismo para la adsorción de sulfatos en el cual los iones sulfato reemplazan grupos OH^- en los óxidos hidratados de hierro y de aluminio. Los iones OH^- liberados reaccionan con los H^+ proce-

dentos de la hidrólisis de iones aluminio que ocurre en presencia de sales fertilizantes.

Con respecto al tipo de arcilla, Harward y colaboradores (1962) demostraron que la cantidad de azufre retenido por diferentes arcillas seguía el orden siguiente: Caolinita > illita > montmorillonita. Este azufre adsorbido por las arcillas es retenido con menor firmeza que el retenido por los óxidos de hierro y aluminio según lo demostraron Aylmore y colaboradores (1967).

De acuerdo con lo anterior, los suelos con contenidos altos de caolinita y de óxidos de hierro y aluminio, como son los oxisoles y ultisoles, tendrán una mayor capacidad para adsorber sulfatos, tal como se ha demostrado en algunas investigaciones (Kamprath, 1968, Bornemisza y Llanos, 1967).

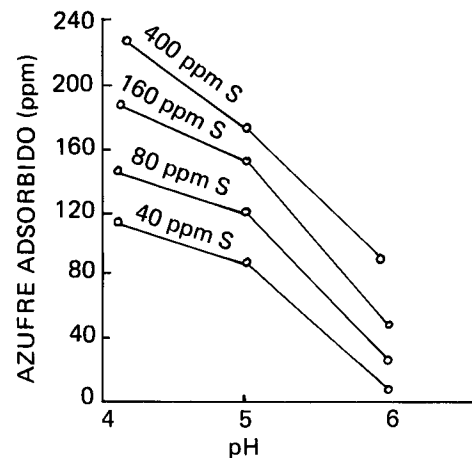


Figura 12. Efecto del pH y de la concentración de sulfatos en la adsorción de $SO_4^{=}$. (Kamprath, et. al., 1956)

En la figura 12 se muestra el efecto del pH en la adsorción de sulfatos. Como se observa, al aumentar el pH la adsorción disminuye; este fenómeno según Kamprath y colaboradores (1956) se atribuye a la disminución de las cargas positivas, responsables de la adsorción de aniones, cuando el pH del medio aumenta.

Otro factor que incide en la adsorción de sulfatos es la concentración de iones fosfato presentes en el medio. Al aumentar la cantidad de fósforo agregado al suelo, la capacidad de adsorción de sulfato disminuye; por otra parte, los iones fosfato son muy efectivos para desplazar el sulfato adsorbido. Este fenómeno fue demostrado por

Aylmore y colaboradores (1967) quienes encontraron que la solución de KH_2PO_4 desorbía un 20% más de sulfato de una arcilla y de la superficie de óxidos, si se comparaba con la cantidad desorbida por el agua. Una vez los iones sulfato son desorbidos de la superficie, entran en la solución del suelo y pueden en esta forma ser fácilmente lavados del perfil. La disponibilidad para la planta del azufre adsorbido depende de la capacidad de adsorción; los suelos que presentan alta capacidad de adsorción la suministran más lentamente (Barrow, 1965).

3.5 Deficiencia de Azufre en Suelos del Trópico

En una amplia revisión sobre la importancia del azufre en la producción de cosechas en el mundo, Coleman (1966) informa acerca de las deficiencias de azufre en 12 países tropicales; además indica que dicha deficiencia está en incremento. Las razones principales de tal aumento según el autor citado son:

- El incremento en el uso de fertilizantes nitrogenados y fosforados, que tienen bajos contenidos de azufre.
- El uso de tecnologías modernas ha elevado los rendimientos de la mayoría de cultivos; por consiguiente se han incrementado las cantidades de azufre extraídas por dichos cultivos.
- El mayor número de experimentos que se están efectuando en los cuales se evalúa el efecto del azufre en forma independiente. Al respecto debe tenerse en cuenta que en la mayoría de experimentos anteriores donde se estudiaban fertilizantes como el sulfato de amonio, el sulfato de potasio, el sulfato de zinc y el superfosfato simple, las respuestas obtenidas se atribuían al nitrógeno, al potasio, al zinc o al fósforo contenidos en dichos fertilizantes y se ignoraba el efecto potencial del azufre.

En un trabajo sobre el azufre en los trópicos, Blair (1979) presenta una lista de 40 países tropicales en donde se han detectado deficiencias de azufre. Sin embargo, muchos de estos casos son estudios aislados y no se conoce su representatividad; por consiguiente, no se puede estimar el área real de incidencia.

Las principales causas de las deficiencias de azufre en los suelos tropicales se pueden agrupar en tres categorías (Blair, 1979): bajo contenido de azufre en el suelo; baja disponibilidad del azufre contenido en la materia orgánica, y deficiencias generadas por prácticas agrícolas.

Los suelos del trópico generalmente presentan bajo contenido de azufre debido a que los materiales parentales son pobres en dicho elemento; además, la acción fuerte del intemperismo y las pérdidas de azufre por lixiviación contribuyen notablemente a agudizar el problema.

En otros casos, son frecuentes las deficiencias de azufre en suelos derivados de cenizas volcánicas, no obstante el alto contenido de azufre orgánico que presentan. En tales suelos la materia orgánica forma complejos muy estables con la alófana, lo cual se manifiesta por un retraso en la mineralización de los materiales orgánicos, entre ellos el azufre orgánico.

Además de lo anterior, en muchas áreas del trópico se pueden generar deficiencias de azufre luego de un período de explotación. Los factores que contribuyen a que esto ocurra son: remoción de azufre por las cosechas, pérdidas de azufre por volatilización, pérdidas por erosión y lavado y uso y manejo de los fertilizantes (Blair, 1979). A continuación se analiza cada uno de estos factores.

3.5.1 Remoción de Azufre por las Cosechas

Las cantidades de azufre extraídas por los cultivos son variables y dependen principalmente de la especie cultivada y del manejo de los cultivos.

En la tabla 3 se presentan las cantidades de algunos nutrientes extraídas por varios cultivos en el Brasil. Como se puede observar existe gran variación en los requerimientos de cada especie. Según tales datos, la extracción de azufre es similar a la de fósforo en algunos cultivos, mientras que otros como el algodón y el frijol extraen mayor cantidad de azufre. Debe tenerse en cuenta que parte del azufre extraído por un cultivo puede volver al suelo por descomposición de los residuos vegetales. La tabla 3 permite estimar las cantidades de azufre que puede volver al suelo si se incorporan los residuos de cosecha.

3.5.2 Uso y Manejo de los Fertilizantes

Hasta hace algunos años era muy común el uso de fertilizantes como el sulfato de amonio, superfosfato simple y sulfato de potasio con el fin de suplir las necesidades de nitrógeno, fósforo y potasio según fuera el caso. Estos materiales contienen azufre y por consiguiente los cultivos podían satisfacer, al menos en parte, sus necesidades

Tabla 3. Cantidades de Nitrógeno, Fósforo y Azufre extraídas por algunos cultivos en el Brasil. (Malavolta, 1982)

Cultivo	Rendimiento Ton/ha	Nutrimentos Extraídos (Kg/ha)		
		Nitrógeno	Fósforo	Azufre
Arroz				
Grano	3.2	45	8.1	5.1
Cáscara	1.1	8	1.5	1.2
Tamo	4.1	28	4.2	4.4
Total	8.4	81	13.8	10.7
Sorgo				
Granos	2.5	40	6	4
Resto	2.5	25	4	3
Total	5.0	65	10	7
Trigo				
Granos	3	75	15	5
Paja	5	50	7	9
Total	8	125	22	14
Algodonero				
Semillas	1.3	29	4.0	10.0
Resto	—	55	4.1	22.8
Total	1.3	84	8.1	32.8
Fríjol				
Vainas	1	37	4	10
Ramas	2	65	5	15
Total	3	102	9	25
Soya				
Vainas	3	200	26	6
Ramas	6	100	14	17
Total	9	300	40	23
Pastos				
Gramineas	13-25	200-300	30-70	20-75
Leguminosas	—	100-200	10-20	10-20
Café				
Frutos	2	33	3	3

de dicho nutrimento. En la actualidad el uso de tales fertilizantes está disminuyendo al ser reemplazados por otros que no contienen azufre. Este hecho contribuye notablemente al aumento de áreas deficientes en azufre.

Otro aspecto importante es el relacionado con la acción de los iones fosfato agregados al suelo sobre los iones sulfato adsorbidos. En la figura 13 se presente dicho efecto. Como se observa, la adsorción de sulfatos en el suelo disminuye al aumentar la concentración de fosfatos. Según Barrow (1969) los iones fosfato reemplazan a los iones sulfato en los sitios de adsorción; en tales condiciones los iones sulfato desplazados quedan libres en la solución del suelo y pueden perderse por lavado o acumularse en profundidad donde no son accequibles para las plantas. Si se tiene en cuenta que en grandes extensiones del trópico la mayor parte de la reserva de azufre del suelo se encuentra adsorbida a los óxidos de hierro y aluminio y a las arcillas 1:1, la aplicación de fertilizantes fosforados a tales suelos contribuye, en cierta medida, a incrementar las deficiencias de azufre en estas regiones.

Las deficiencias de azufre pueden presentarse por cambios en el pH del suelo debido al efecto de materiales encalantes. Como ya se discutió el aumento en el pH trae como consecuencia menor adsorción de sulfatos en esta forma se aumenta la pérdida de azufre por lavado.

3.5.3 Pérdidas de Azufre por Erosión y Lavado

El sulfato soluble aplicado como fertilizante y el producido por la mineralización de la materia orgánica pueden ser transportados por el agua si no son adsorbidos por el suelo. Parte de este azufre se pierde del perfil de suelo y parte se acumula a profundidades donde no es accequible para la planta. En diferentes investigaciones se ha encontrado que los sulfatos se acumulan a profundidades mayores de 40 cm. (Bromfield, 1972).

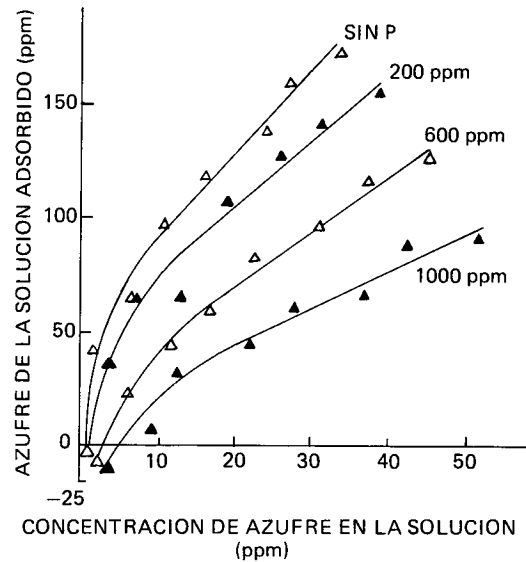


Figura 13. Efecto de la concentración de fosfatos en la adsorción de sulfatos en el suelo. (Barrow, 1969)

Con respecto a las pérdidas por erosión no existen datos que permitan evaluar las cantidades de nutrimentos perdidos por estos procesos. Sin embargo, en zonas con erosión severa hay pérdidas de suelo, de materia orgánica y por consiguiente de nutrimentos.

3.5.4 Pérdida de Azufre por Volatilización

Este caso es importante en regiones donde se acostumbra a efectuar quemas. Según Malavolta (1984) en algunas zonas del Brasil se efectúan quemas para limpiar los potreros o para incorporar nuevas tierras a la agricultura; en estas condiciones el azufre contenido en los materiales vegetales pasa a forma gaseosa y se volatiliza. Este proceso puede ser de importancia en los Llanos Orientales de Colombia donde son comunes las quemas.

El azufre puede perderse también, por volatilización como H_2S principalmente en suelos inundados donde predominan las condiciones de reducción.

4. Diagnóstico de las deficiencias de azufre

La capacidad de un suelo para suministrar azufre en cantidades adecuadas para las plantas depende en gran parte de la cantidad de sulfato soluble presente, la intensidad de la adsorción de sulfatos y la tasa de mineralización del azufre orgánico.

En el diagnóstico de las deficiencias de azufre se han utilizado métodos como el análisis de suelo, los análisis de tejido vegetal, pruebas biológicas y síntomas visuales de deficiencias nutricionales en las plantas. Las pruebas biológicas son poco utilizadas por ser costosas y requerir mucho tiempo. Lo referente a los síntomas visuales de deficiencia de azufre en las plantas, se discutió en la sección correspondiente al azufre en la planta. Por consiguiente aquí sólo se analizará los relacionados con los análisis de suelos y tejido vegetal.

4.1 Análisis de Suelo

El análisis químico de suelos se ha utilizado comúnmente para conocer los niveles de azufre y tomar decisiones sobre la aplicación de fertilizantes. Estos análisis buscan obtener un valor de concentración de azufre en el suelo, bajo el cual la respuesta a la fertilización es cierta o probable (Blair, 1979).

Según Tisdale y Nelson (1975) la determinación de las necesidades de azufre mediante el análisis de suelo se dificulta debido a las diferentes formas como se encuentra dicho elemento en el suelo. Por su parte Blair (1979) considera que en la zona templada el principal problema de los estudios de azufre en el suelo consiste en que en períodos cortos de tiempo se produce gran variación en las cantidades de las diferentes formas de azufre presentes en el suelo. Lo anterior ocurre por características propias de dicha zona, que originan fluctuaciones de la temperatura y de la humedad; en estas condiciones ocurren transformaciones rápidas del azufre. Así, cuando disminuye el contenido de humedad en el suelo, los sulfato-ésteres pasan rápidamente a formas inorgánicas y de esta manera se cambia la proporción relativa de las formas de azufre en el suelo, incluyendo las disponibles para la planta. En los trópicos no ocurren tales fluctuaciones en la temperatura y humedad; por consiguiente el análisis de suelo puede ser de mayor utilidad.

Un problema generalizado que afecta las investigaciones sobre el azufre del suelo, se relaciona con los métodos

analíticos y con la preparación de las muestras. Estos aspectos han contribuido a que se obtengan resultados muy variables y de difícil interpretación (Blair, 1979).

Con respecto a la preparación de las muestras debe tenerse en cuenta que dadas las características de los sulfato-ésteres, el proceso de secado puede influir notablemente en los resultados que se obtengan. Al respecto Freney y colaboradores (1962) establecieron que muchos de los fracasos obtenidos al intentar correlacionar el azufre extraído por algún método y la respuesta de los cultivos, podían deberse al procedimiento de secado de las muestras de suelo. Igualmente Williams y Steinbergs (1964) encontraron variaciones significativas en el azufre extraído con KH_2PO_4 debido a las temperaturas de secado. Peveril y colaboradores, citados por Blair (1979), estudiaron dicho problema y encontraron que la adición de carbón activado a la solución extractora de fosfato de calcio reduce a niveles insignificantes las variaciones resultantes del secado de las muestras.

4.1.1 Métodos de Extracción y Determinación del Azufre en el Suelo

Los métodos existentes para la extracción del azufre del suelo se pueden agrupar en tres categorías de acuerdo con la forma de azufre que extraigan:

- Para sulfatos solubles.
- Para sulfatos solubles y adsorbidos.
- Para azufre total y para azufre orgánico.

Todos los métodos implican la remoción del azufre por medio de algún extractante específico para su posterior determinación. Existe gran número de extractantes entre los cuales Murphy y Brogan (1981) mencionan los siguientes: agua o cloruro de calcio para las formas solubles; si se va a extraer el azufre soluble junto con el adsorbido se utilizan extractantes neutros o ligeramente alcalinos que contengan iones fosfato para desplazar los iones SO_4^- adsorbidos. Las soluciones generalmente empleadas para tal fin son: cloruro de litio, fosfato de potasio, fosfato de calcio, bicarbonato de sodio y acetato de amonio. Algunas de estas soluciones pueden extraer pequeñas porciones del azufre orgánico. Para extraer el azufre total la muestra se somete a un proceso de fusión y luego se hace la extracción con una solución generalmente ácida.

Mientras para el azufre orgánico es necesario eliminar primero las formas inorgánicas, someter luego la muestra a un proceso de ignición y extraer el azufre desplazándolo con una solución de fosfato.

No todos los extractantes son adecuados para todos los suelos; la elección del más apropiado debe hacerse mediante un proceso de investigación y calibración del método en diferentes regiones y con diferentes cultivos.

En la mayoría de investigaciones no se han obtenido correlaciones entre el azufre total o el azufre orgánico y la respuesta de las plantas; por lo tanto estas fracciones no son adecuadas para diagnosticar las deficiencias de azufre (Blair, 1979; Murphy y Brogan, 1981). Las mejores correlaciones se han obtenido con los métodos que extraen el azufre soluble junto con la fracción adsorbida; y dentro de estos métodos aquellos que utilizan una solución de fosfato monocálcico (CaH_2PO_4) parecen ser los más adecuados para las condiciones de la zona templada y de los trópicos; (Blair, 1979). El fosfato de calcio tiene como ventaja que el Ca^{++} no dispersa las arcillas o la materia orgánica, lo que sí ocurre con el sodio o con el potasio.

En todos los métodos la determinación del azufre se hace como sulfato de bario por turbidimetría (Tisdale y Nelson, 1975).

4.1.2 Niveles Críticos de Azufre en el Suelo

El nivel crítico de un elemento en el suelo se define como el contenido de dicho elemento por debajo del cual el rendimiento de un cultivo decrece y se hace menor que el óptimo (Tisdale y Nelson, 1975).

En la Tabla 4 se presentan algunos niveles críticos obtenidos en diferentes países para varios cultivos. De acuerdo con dichos resultados existe gran variabilidad en los mismos, hecho que pone de presente la necesidad de efectuar estudios de calibración de métodos para cada región.

4.2 Análisis de Tejido Vegetal

El análisis de tejido vegetal tiene como base la premisa de que la cantidad de un elemento en la planta está directamente relacionada con la cantidad de ese nutrimento en el suelo.

4.2.1 Criterios utilizados para el diagnóstico

Como criterio de diagnóstico se ha propuesto el azufre total, el azufre como sulfato y la relación nitrógeno total / azufre total.

Tabla 4. Niveles críticos de Azufre en el suelo para algunos cultivos. (Blair, 1979)

Método de Determinación	Cultivo	Nivel Crítico S ppm	País
KH_2PO_4 —500 ppmP	Pastos	8	N. Zelandia
	Pastos	4	Australia
	Maíz	4	Nigeria
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ —500 ppmP	Alfalfa	10	
	Maíz	8	
	Varios cultivos y pastos	13	Australia
	Pastos	5-4	Australia
CaCl_2 0.01 M	Maíz	4	Nigeria
	Leguminosas forrajeras	3	Canadá
Agua	Pastos	6	Canadá
	Leguminosas forrajeras	.3	Canadá

Tabla 5. Niveles críticos de Azufre en la planta, para diferentes cultivos.

Cultivo	Nivel Crítico		País	Referencia
	S	%		
Leguminosas	0.13	0.15	Australia	Andrew (1974)
Maíz - Sorgo	0.12		Australia	Andrew (1974)
Tabaco	0.25		Australia	Andrew (1974)
Pasto guinea	0.10	0.15	Brasil	Malavolta (1984)
Colza	0.10		Brasil	Malavolta (1984)
Sorgo	0.15		Brasil	Malavolta (1984)
Maíz	0.18		U. S. A.	Reneau (1981)
Pastos	0.20		Irlanda	Murphy, Brogan (1981)
Maíz	0.24		—	Daigger y Fox (1977)

El azufre total es el parámetro generalmente utilizado para diagnosticar las deficiencias de azufre; al determinar los niveles críticos debe tenerse en cuenta que el contenido de azufre total en las plantas disminuye marcadamente con el crecimiento (Ensminger y Freney, 1966). El azufre como sulfato se ha utilizado en algunas investigaciones para determinar las deficiencias de azufre en el suelo (Murphy y Brogan, 1981). Sin embargo, el contenido de sulfatos en el tejido puede variar por interferencia de otros nutrimentos y por consiguiente no es un criterio adecuado.

Según Dijkshoorn y Van Wijk (1976) en diferentes investigaciones se ha utilizado como criterio de diagnóstico la relación nitrógeno total: azufre total, con la suposición de que un contenido de azufre en la planta, inferior al requerido para mantener la relación N:S de las proteínas constituye una deficiencia de azufre. La relación establecida para las proteínas es de 15:1 para la mayoría de las plantas; relaciones superiores sugieren la necesidad de aplicar azufre al suelo. Con respecto a dicho criterio Stewart (1969) afirma que no es adecuado ya que no

distingue entre una deficiencia de azufre y un exceso de nitrógeno. Blair y Crofts citados por Blair (1979) propusieron el uso de los tres parámetros anteriormente mencionados para el diagnóstico de las deficiencias de azufre en cereales.

4.2.2 Niveles críticos en las plantas

El nivel crítico en la planta es la concentración justamente suficiente para no restringir el crecimiento, por encima del cual hay consumo de lujo y por debajo carencia del elemento (Ensminger y Freney, 1966). Los niveles críticos deben establecerse para cada especie vegetal. En la tabla 5 se muestran algunos niveles críticos establecidos para diferentes cultivos.

Wrigley y colaboradores (1984) demostraron que el contenido de nitrógeno y azufre en el grano de trigo pueden ser utilizados para diagnosticar deficiencias de azufre y propusieron el nivel de 0.12 % de azufre en el grano y la relación N:S de 17:1; si el porcentaje de azufre es inferior al señalado y la relación N:S más amplia habrá deficiencias de azufre.

5. Respuesta de algunos cultivos a la aplicación del azufre

El azufre es un nutrimento que influye no solo en los rendimientos sino también en la calidad de las cosechas por su participación en la constitución de los aminoácidos. Son muchos los casos registrados sobre la respuesta de diferentes cultivos a la fertilización con azufre. Así Blair (1979) presenta una lista de 40 países tropicales ubicados en África, Centro y Sur América, Asia y Oceanía en los cuales se han obtenido respuestas positivas de diferentes cultivos a la fertilización con azufre. En la presente publicación únicamente se mencionarán algunos ejemplos que muestran la incidencia del azufre en el rendimiento y en la calidad de las cosechas.

El Brasil es uno de los países Latinoamericanos donde se han obtenido un buen número de respuestas positivas de varios cultivos a la aplicación de azufre. Según Malavolta (1984), en muchos suelos del Brasil se presentan deficiencias de azufre lo cual se debe a los bajos contenidos de materia orgánica, como es el caso de los "Suelos arenosos de cerrado"; a la alta relación carbono / azufre que retrasa la mineralización del azufre orgánico; a las quemaduras que producen pérdidas de azufre en forma gaseosa y a la disminución en el uso de fertilizantes fosforados y nitrogenados que contengan azufre. En la tabla 6 se presentan algunas respuestas obtenidas en varios cultivos por la aplicación de azufre.

La zona de Basines de la Amazonía brasilera es una re-

gión de gran importancia para la producción de arroz en inundación; sin embargo, la deficiencia de azufre es allí un factor limitante de la producción, (Wang et al., 1977). De acuerdo con Wang (1978), la producción de arroz disminuyó desde 5.63 toneladas/hectárea en las primeras cosechas hasta 1.32 ton/ha., después de una a tres cosechas debido a la deficiencia de azufre (Tabla 7). Al examinar algunas variables se encontró que el descenso de la producción de arroz se debía a una marcada disminución de la formación de panículas y a un menor número de granos por panícula.

En la investigación anterior se cuantificó el azufre extraído por una cosecha de arroz y se encontró que al producir entre 4 y 9 toneladas/hectárea, se extraen entre 8 y 17 Kg. de azufre/ha. Sin embargo, es necesario agregar al suelo entre 20 y 25 Kg. de azufre por hectárea para suplir los requerimientos de cultivo. Debe tenerse en cuenta que no todo el azufre agregado al suelo puede ser tomado por la planta ya que una parte es inmovilizada por los microorganismos, otra porción se pierde por lavado y una parte es reducido quedando así en formas no disponibles para la planta. En general, la absorción de azufre se incrementa al aumentar la cantidad de nitrógeno agregado al suelo, debido a que ambos nutrimentos son constituyentes esenciales de las proteínas. La absorción de azufre por la planta de arroz también dependió del drenaje del suelo; en condiciones de buen drenaje se incre-

Tabla 6. Respuesta de algunos cultivos a la aplicación de Azufre en el Brasil. (Malavolta, 1982)

Suelo	Cultivo	Tipo de Experimento	Aumento %
Cerrado (GO)	Café	Potes	623 (+)
Arenita de Bauru	Café	Campo	182
Cerrado (SP)	Soya	Campo	137
Aluvial (MG)	Millo	Potes	135 (+)
Orgánico (MG)	Millo	Invernadero	187 (+)
Varzes (PA)	Arroz	Invernadero	400
		Campo	241
Latosol rojo	Caña	Invernadero	127
Podzólico	Caña	Invernadero	131

+ *Materia Seca*

Fuente de Azufre: Yeso

Tabla 7. Efecto de deficiencias severas de Azufre en la producción del arroz y en el número de panículas. (Wang, 1978)

Estado nutricional con respecto al Azufre	Grano		Número de panículas	
	(t/ha)	%	No./m ²	%
Plantas con deficiencia de S	1.32	23.4	195	44.5
Plantas normales	5.63	100.0	438	100.0

Tabla 8. Efecto de dosis de Azufre en la producción de arroz y en el contenido de Azufre, en un suelo de la Amazonía del Brasil. (Wang, 1978).

Dosis de Azufre (Kg.-S/ha)	Producción de Grano (T/ha)*	Contenido de Azufre en la paja (%)	
		S-Total	Sulfatos
0	5.11	0.050	0.010
50	7.37	0.075	0.010
1000	7.49	0.209	0.047

* 14% de Humedad

mentó la extracción de azufre pero disminuyó la producción de materia seca, comparado con condiciones de inundación. Aparentemente la disminución en la absorción de azufre es debida a la reducción de los sulfatos que ocurre en condiciones de inundación.

El exceso de azufre parece no ser perjudicial para el rendimiento del arroz. Como se observa en la Tabla 8, las aplicaciones de 1000 Kg. de azufre por hectárea incrementaron notablemente la concentración de azufre en la planta, sin afectar negativamente la producción. En otras investigaciones se ha encontrado que no hay toxicidad de azufre en el arroz con dosis hasta de 200 ppm de SO₄⁼ (Nageswar, et. al., 1980).

Un aspecto importante en la fertilización de arroz con azufre es la época de aplicación del fertilizante. Como se observa en la figura 14, para lograr el máximo efecto debe aplicarse el azufre lo más pronto posible. De acuerdo con los resultados presentados, si la aplicación se efectúa durante los primeros 50 días del cultivo, o sea antes de la formación de la panícula, la producción de grano no será afectada negativamente por deficiencia de azufre.

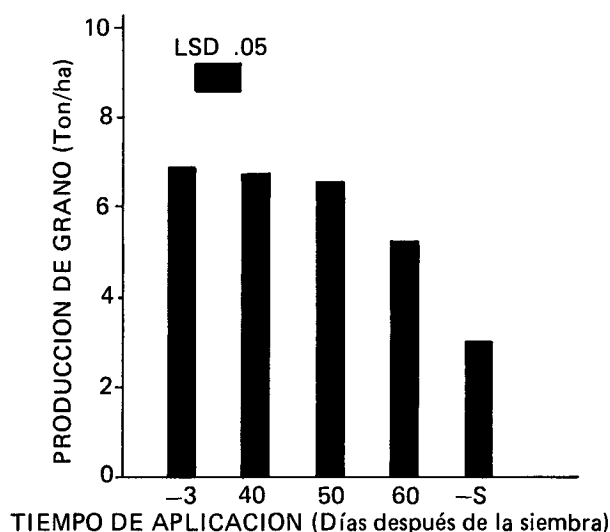


Figura 14. Relación entre la época de aplicación del Azufre al suelo y el rendimiento del arroz. (Wang, 1978)

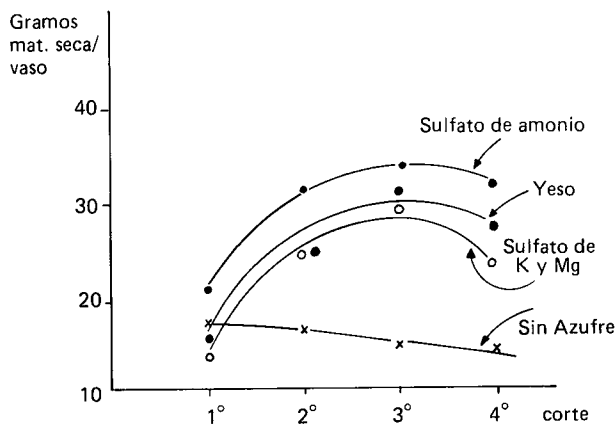


Figura 15. Efecto de fuentes de Azufre en la producción de pasto guinea en el Brasil. (Malavolta, 1982)

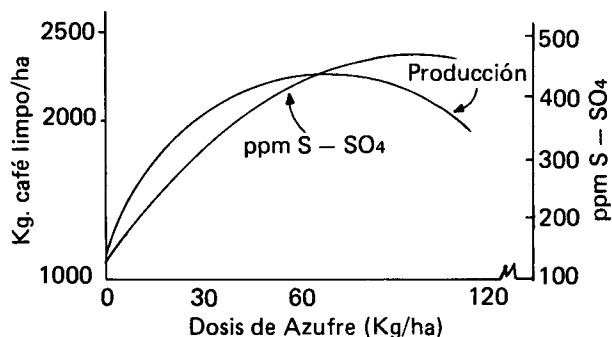


Figura 16. Efecto del Azufre en la producción de café y en la concentración de SO_4 en la planta. (Malavolta, 1982)

Tabla 9. Efecto del Azufre en el rendimiento y composición del Pasto Orchard. (Tisdale y Platou, 1981)

Dosis de S Kg/ha	Rendimiento Ton./ha	Nitrógeno no Proteínico %	Nitratos %
0	7.44	1.19	0.258
23	8.29	0.82	0.263
45	8.71	0.60	0.240
90	9.16	0.48	0.210
113	8.85	0.48	0.178

En lo referente a la mejor fuente de azufre para el arroz, el sulfato de amonio parece ser la forma más adecuada de aplicar no sólo el azufre sino también el nitrógeno.

Además del Brasil, las deficiencias de azufre en el cultivo de arroz bajo inundación se han encontrado en otros países como Indonesia, India, Filipinas y Pakistán. (Ismunadji y Zulkarnaini, 1978).

Otro caso sobre suelos deficientes en azufre en el Brasil lo constituyen los "suelos arenosos de Cerrado" en Sao Paulo. La figura 15 muestra la respuesta del pasto guinea (*Panicum maximum*) a las diferentes fuentes de azufre. Como se puede observar, después del primer corte la producción de materia seca disminuyó progresivamente en los tratamientos que no recibieron azufre; en los otros tratamientos hay incremento del rendimiento por acción del azufre. En este caso el sulfato de amonio es también la mejor fuente de azufre.

El cultivo del café ha respondido también a la fertilización con azufre en el Brasil. Tal como se observa en la figura 16 la producción de café y el contenido de sulfatos en la planta se incrementaron notablemente por acción del azufre agregado al suelo.

Como ya se ha mencionado, el azufre influye también en la calidad de las cosechas. Según Tisdale y Platou (1981) en los tejidos de algunas plantas forrajeras se pueden acumular cantidades de nitratos que son tóxicos para los animales que consuman tales forrajes. Según estos autores en algunas investigaciones se ha encontrado que las aplicaciones de azufre al suelo además de incrementar la producción de forraje, disminuyen las concentraciones de nitrógeno no proteínico y nitratos presentes en el tejido vegetal (Tabla 9). Esta disminución de los nitratos ha sido encontrada en las plantas de algodón y soya según lo informan Zund y colaboradores (1978).

En el cultivo del trigo. Wrigley y colaboradores (1984) encontraron que la deficiencia de azufre disminuyó la producción de grano y bajó la calidad del mismo. Estos efectos surgen por insuficiencia de azufre para la síntesis de los aminoácidos esenciales cistina y metionina; adicionalmente disminuye el contenido de otros aminoácidos y se aumenta la concentración de ácido aspártico. Estos cambios en la composición del grano afectan la calidad alimenticia del trigo; además los grupos $-SH$ y $S-S$ de los aminoácidos son importantes para dar propiedades físicas adecuadas a la masa para el pan.

El contenido total de proteínas también disminuye en muchas cosechas cuando hay deficiencias de azufre. Este hecho trae serias repercusiones en la nutrición humana. (Tisdale y Nelson, 1975).

En otros casos se ha encontrado que la fertilización de algunas oleaginosas con azufre trae como consecuencia un aumento en el porcentaje de aceite en las semillas; en investigaciones en la India, el aumento en el porcentaje de aceite en diferentes semillas fue de 5.9%(Tandon, 1985).

6. Fertilizantes utilizados como fuentes de azufre

Existen muchos materiales fertilizantes que contienen azufre. Algunos son aplicados al suelo con la función específica de suministrar azufre; pero la mayoría se aplican con el fin de suplir las necesidades de otros nutrientes. En este caso el azufre se aplica en forma incidental. En la Tabla 10 se presenta el contenido de nitrógeno, fósforo, potasio y azufre en diferentes materiales utilizados como fertilizantes. A continuación se comentan algunas características de los fertilizantes azufrados más importantes.

6.1 Sulfato de Amonio $(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)$

Este es un fertilizante importante utilizado normalmente para suministrar nitrógeno al suelo. De acuerdo con Hagstrom (1981) el sulfato de amonio se obtiene como subproducto de la industria del acero y de algunos procesos metalúrgicos y químicos. También se obtiene como sub-producto de la caprolactama. Sintéticamente se puede producir por reacción del amoniaco anhidro con el ácido sulfúrico.

10. Contenido de Varios Fertilizantes en Azufre y Elementos Nutritivos Primarios (PORCENTAJES)¹

MATERIAL	AZUFRE	NITROGENO	FOSFORO	POTASIO
AMONIACO ANHIDRO	—	82	—	—
SOLUCION AMONIACO-AZUFRE	10	74	—	—
NITRATO DE AMONIO	—	33.5	—	—
NITROSULFATO DE AMONIO	5	30	—	—
FOSFATO DE AMONIO	3	11	48	—
FOSFO-SULFATO DE AMONIO	15.4	16	20	—
POLISULFURO DE AMONIO	40	20	—	—
SULFATO DE AMONIO	24	21	—	—
SULFO-NITRATO DE AMONIO	15	26	—	—
SOLUCION DE TIOSULFATO DE AMONIO	20	12	—	—
SUPERFOSFATO AMONIZADO	11-13	3-7	16-19	—
SULFATO DE COBRE	12.8	—	—	—
SULFATO DE CALCIO (YESO)	15-18	—	—	—
FOSFATO DIAMONICO	2	18	46	—
FOSFATO DIAMONICO-AZUFRE	10-15	15-16	39-41	—
SULFATO DE MAGNESIO (KIESERITA)	23	—	—	—
SULFATO DE MANGANESO	14-17	—	—	—
CLORURO DE POTASIO	—	—	—	60
SULFATO DE POTASIO Y MAGNESIO	22	—	—	22
SULFATO DE POTASIO	17-18	—	—	48-51
NITRATO DE SODIO	—	16	—	—
AZUFRE ELEMENTAL	85-99	—	—	—
ANHIDRIDO SULFUROSO	50	—	—	—
SUPERFOSFATO (NORMAL)	12	—	20	—
SUPERFOSFATO (CONCENTRADO)	1.5	—	30-50	—
SUPERFOSFATO (CONCENTRADO)-AZUFRE	20	—	40	—
UREA	—	42-46	—	—
UREA-AZUFRE	10	40	—	—
SULFATO DE ZINC	13-18	—	—	—

¹ La riqueza en nitrógeno y azufre se expresa en tanto por ciento de S y N elementales; fósforo y potasio se expresan en tanto por ciento de P_2O_5 y K_2O equivalente.

El uso del sulfato de amonio, ha ido disminuyendo en muchas regiones del mundo, hecho que ha contribuido a la aparición de deficiencias de azufre en algunos lugares. La causa del descenso en el consumo es su baja concentración de nitrógeno (21%) lo cual lo coloca en desventaja frente a la urea y al nitrato de amonio, por los mayores costos de transporte, almacenamiento y aplicación (Hagstrom, 1981). Sin embargo, este fertilizante además de tener excelentes propiedades físicas contiene 24% de azufre y ofrece algunas ventajas agronómicas como fuente de nitrógeno. Así, en Colombia el sulfato de amonio ha mostrado mejor efecto que otras fuentes nitrogenadas en el cultivo de algodón. (Federalgodón, 1978), y en otros cultivos. Según Muñoz (1980) la aplicación de Azufre podría estar incidiendo en el rendimiento de la caña panelera en Antioquia, tanto como el nitrógeno, el fósforo y el potasio.

La Federación de Algodoneros, (1978) ha comprobado deficiencias de azufre en las zonas algodonerías de Espinal y Chicoral, lo cual explica los mayores incrementos en rendimiento de algodón semilla observados con el uso de sulfato de amonio, en comparación a los obtenidos con urea.

6.2 Superfosfato Simple

Químicamente es una mezcla de fosfato monocálcico y yeso. El uso de este fertilizante está disminuyendo en muchas áreas del mundo por razones similares a las enunciadas por el sulfato de amonio. Así, según Hagstrom (1981) mientras en 1955 el superfosfato simple representaba un 60% del consumo mundial de fertilizantes fosforados, en 1975 solamente representaba el 30% y presentaba una tendencia a disminuir. El superfosfato simple es un fertilizante de baja concentración de fósforo (20% de P_2O_5) comparado con el superfosfato triple (46% de P_2O_5) o con los fosfatos diamónico y monoamónico (46 y 50% de P_2O_5 respectivamente). Sin embargo contiene aproximadamente 13% de azufre y es una fuente adecuada de este nutrimento para las plantas (Hagstrom, 1981).

6.3 Sulfato de Potasio (K_2SO_4)

Es una fuente importante de potasio y de azufre, (50% de K_2O ; 18% de S). En Colombia se ha utilizado como

fuentes de potasio en cultivos que pueden ser afectados por el cloro como el tabaco, y la vid; igualmente en suelos con problemas de sales (Guerrero, 1983).

6.4 Sulfato Doble de Potasio y Magnesio

Este fertilizante conocido generalmente como Sulpomag contiene potasio (22% de K_2O), magnesio (18% de MgO) y azufre (22%). En Colombia el uso es mínimo debido al costo relativamente alto y al desconocimiento que se tiene sobre su comportamiento agronómico. (Guerrero, 1983).

6.5 Yeso

Es poco utilizado como fertilizante. Es útil en la recuperación de suelos salino-sódicos y sódicos. Sin embargo, es una buena fuente de azufre por tratarse de una sal neutra.

6.6 Azufre Elemental

Su utilización como fertilizante es mínima ya que presenta problemas, pues una vez agregado al suelo debe ser oxidado a sulfato para poder ser absorbido por la planta. Este proceso de oxidación ocurre por acción de las bacterias y depende del grado de finura del material. El transporte, almacenamiento y aplicación de este material en tales condiciones presenta muchos inconvenientes (Hagstrom, 1981).

6.7 Urea Recubierta con Azufre

Es una fuente de nitrógeno y de azufre muy poco utilizada en Colombia. Es un producto en el cual el gránulo de urea contiene una película de azufre, con el fin de lograr una liberación lenta del nitrógeno. El contenido de azufre varía con el espesor de la película; el producto típico contiene 36% de nitrógeno y 16% de azufre (Hagstrom, 1981).

6.8 Urea – Acido Sulfúrico

Es un fertilizante líquido con 28% de nitrógeno y 18% de azufre. Se produce por reacción de la urea, el ácido sulfúrico y el agua. Es recomendado para recuperar suelos sódicos (Gregory, 1984).

7. Investigaciones sobre azufre en Colombia

Las investigaciones sobre azufre en Colombia son pocas y aisladas; no obstante se han obtenido algunos avances principalmente en ensayos en invernadero. A continuación se resumen los principales resultados obtenidos.

En la Tabla 11 se presentan los contenidos del azufre to-

tal, orgánico y extractable en suelos de varias regiones del país. En forma general se observa que el contenido total de azufre es inferior a los valores encontrados en Centro América y superior a los obtenidos en el Brasil. (Tabla 2).

Tabla 11. Contenido de Azufre en algunos Suelos de Colombia

Localidad	Número muestras	Formas de S ppm			Referencia
		S—Total	S—Orgánico	S—Extractable	
Boyacá	1	719	337	21	Martínez (1983)
Nariño	2	420	374	12	Martínez (1983)
Santander	3	618	291	23	Martínez (1983)
Tolima	2	288	224	30	Martínez (1983)
Cundinamarca	18	551	346	27	Martínez (1983)
Sabana de Bogotá: Serie Bermeo	3	377	232	32	Guerrero y Burbano, (1979)
Serie Tibaitatá	2	420	148	41	Guerrero y Burbano, (1979)
Serie Río Bogotá	1	470	360	60	Guerrero y Burbano, (1979)
Llanos Orientales: Pie de Monte	1	394	322	10	Pedraza y Lora (1974)
	7	619	193	7	González (1983)
Altillanuras	1	512	63	9	Guerrero y Burbano, (1979)
	1	405	352	7	Pedraza y Lora (1974)
Vegas	2	593	82	16	Guerrero y Burbano, (1979)
Terrazas Altas	7	406	91	6	Guerrero y Burbano, (1979)
Terrazas Bajas	1	306	33	5	Guerrero y Burbano, (1979)
Sur del Huila	30	813	478	10	Gómez (1981)
Urabá	4	851	70	8	Aristizábal y Hernández, (1985)
Llanura Pacífico	—	1776	316	119	Ayala et. al. (1973)
Sabana Túquerres	—	1248	189	83	Ayala et. al. (1973)
Altiplano Ipiales	—	1015	180	79	Ayala et. al. (1973)
Altiplano Pasto	—	2027	223	52	Ayala et. al. (1973)
Putumayo	—	1024	218	74	Ayala et. al. (1973)

Tabla 12. Respuesta del Sorgo a la Fertilización con Azufre en suelos de los Llanos Orientales, Colombia. (Guerrero y Burbano, 1979)

Suelo	Rendimiento Materia Seca (g/maceta)		Absorción de S (mg/maceta)	
	Sin S	60 KgS/ha	Sin S	60 KgS/ha
Terrazas Altas	5.5	10.3	3.7	8.7
Altillanura	4.4	9.5	3.9	8.5
Terrazas Bajas	8.6	10.2	4.5	9.0

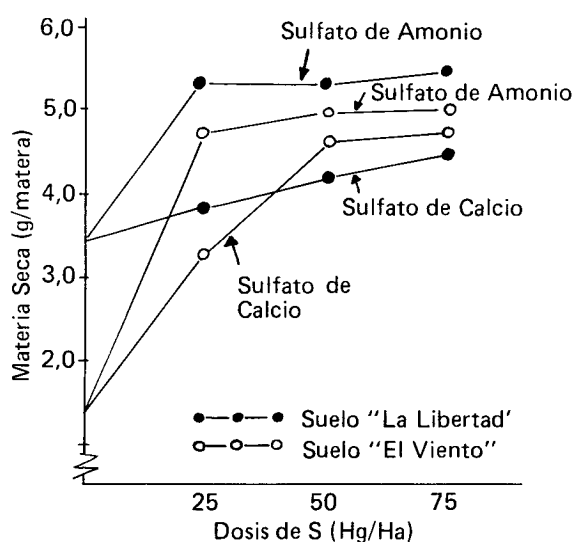


Figura 17. Eficacia de dos fertilizantes en la aplicación de Azufre en suelos de los Llanos Orientales (Pedraza y Lora, 1974)

En Colombia, los mayores contenidos de azufre total se encuentran en los altiplanos de Pasto e Ipiales, Llanura del Pacífico, Putumayo y Sabana de Túquerres; los menores contenidos corresponden a los suelos del Tolima. Por otra parte en la mayoría de los suelos de los Llanos Orientales, Nariño, Putumayo y Urabá, predominan ampliamente las formas de azufre inorgánico sobre las formas orgánicas. En cuanto al azufre extractable (disponible) los menores contenidos se presentan en suelos de los Llanos Orientales, Huila, Urabá y algunos de Nariño.

De acuerdo con lo anterior, se encuentra que existe gran variación en el contenido de las distintas formas de azufre entre los suelos de las regiones estudiadas y aún entre los de una misma región; las causas de tal fenómeno son

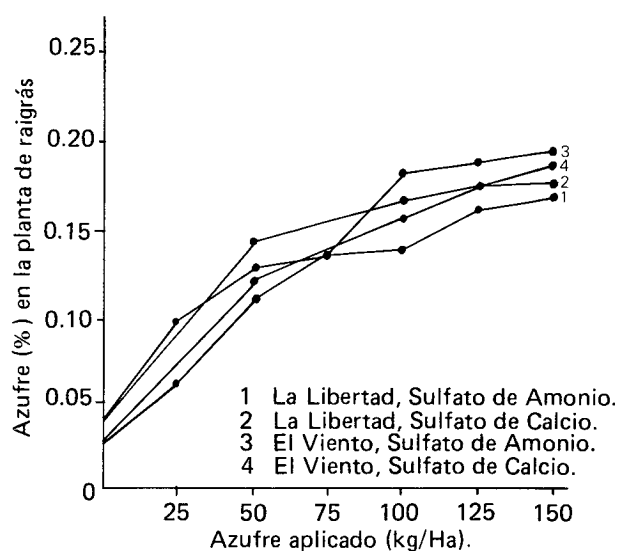


Figura 18. Influencia del Azufre en la concentración del mismo en las plantas de reygrass, en suelos de los Llanos Orientales. (Pedraza y Lora, 1974)

difíciles de conocer debido a que en la mayoría de investigaciones no se incluye información acerca de las características morfológicas y taxonómicas de los suelos estudiados, ni de las condiciones climáticas específicas del área bajo estudio.

En lo referente a las respuestas de los cultivos a la fertilización con azufre, Guerrero y Burbano (1979) trabajaron con suelos de la Sabana de Bogotá y los Llanos Orientales, en condiciones de invernadero, y encontraron respuesta positiva a las aplicaciones de azufre en la producción de materia seca y en la absorción del nutriente por las plantas de sorgo en los suelos de los Llanos Orientales (Tabla 12). En estos suelos la aplicación de 60 Kg. de azufre por hectárea incrementó la producción de materia seca y la absorción de azufre por las plantas. Por

Tabla 13. Coeficientes de correlación (*r*) entre el S extraído por dos métodos y la absorción y concentración de S en la planta. (González, 1983)

	Concentración de S en la planta		
	Dosis de S Aplicada (Kg/ha)		
	0	60	120
S—extraído con LiCl	-0.194 ns	-0.139 ns	0.140 ns
S—extraído con Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0.782**	0.566*	0.696**

	Absorción de S por la planta		
	Dosis de S Aplicada (Kg/ha)		
	0	60	120
S—extraído con LiCl	0.509 ns	-0.214 ns	-0.230 ns
S—extraído con Ca(H ₂ PO ₄) ₂	0.841**	0.849**	0.985**

* Significativo a un nivel de confiabilidad del 95%

** Significativo a un nivel de confiabilidad del 99%

ns No significativo.

otra parte, las mayores correlaciones del rendimiento y la absorción de azufre se encontraron con el azufre extraído por la solución de Ca (H₂PO₄)₂ 0.008 M. El nivel crítico propuesto para dicho método fue de 10 ppm.

Pedraza y Lora (1974) trabajaron en invernadero con dos suelos de los Llanos Orientales que contenían 7.3 y 10.2 ppm de azufre extraído con LiCl y encontraron efecto altamente significativo en la producción de materia seca del pasto "ryegrass" y en la absorción de azufre por las plantas, por aplicación de diferentes dosis del elemento procedente de sulfato de amonio y sulfato de calcio (Figuras 17 y 18). El nivel crítico propuesto para el método de extracción con LiCl fue de 5 ppm.

Por su parte, González (1983) con suelos del Meta (Tropthent, Dystropept y Tropaquent), bajo condiciones de invernadero, encontró efecto altamente significativo de la aplicación de azufre en el rendimiento de materia seca y en la concentración y absorción de azufre por las plantas de sorgo. Igualmente encontró coeficientes de correlación altamente significativos entre el azufre extraído con la solución de Ca (H₂PO₄)₂ 0.008 M y la concentración y absorción de azufre por la planta (Tabla 13). El azufre extraído con LiCl presentó correlaciones no significativas.

Munévar y Rozo (1982) trabajaron en campo, en suelos de la serie Bacatá (Distrandept típico, medial, isomésico) en la Sabana de Bogotá y encontraron que la aplicación de azufre en forma de yeso aumentó la producción de forraje seco en el trébol rojo y en el ryegrass (Tabla 14); igualmente se incrementó el contenido de nitrógeno y de azufre en las plantas. Recomiendan aplicar de 50 a 75 kg. de S/ha para fertilización de praderas.

Castillo y Lora (1985) en varios suelos de la cuenca del Río Suárez (Eutropept vértico, Argiudoll típico, Dystropept óxico, Humitropept ácuico, Eutropept típico) en

Tabla 14. Producción de Forraje seco de la mezcla de ryegrass y trébol blanco con diferentes aplicaciones de azufre en la Sabana de Bogotá. (Munévar y Rozo, 1982)

Dosis de S Kg/ha	Materia Seca* (Kg/ha)	
	Trébol	Ryegrass
0	428	1446
10	587	1538
25	573	1391
50	641	1640
75	611	1514

* Promedio de 7 cortes.

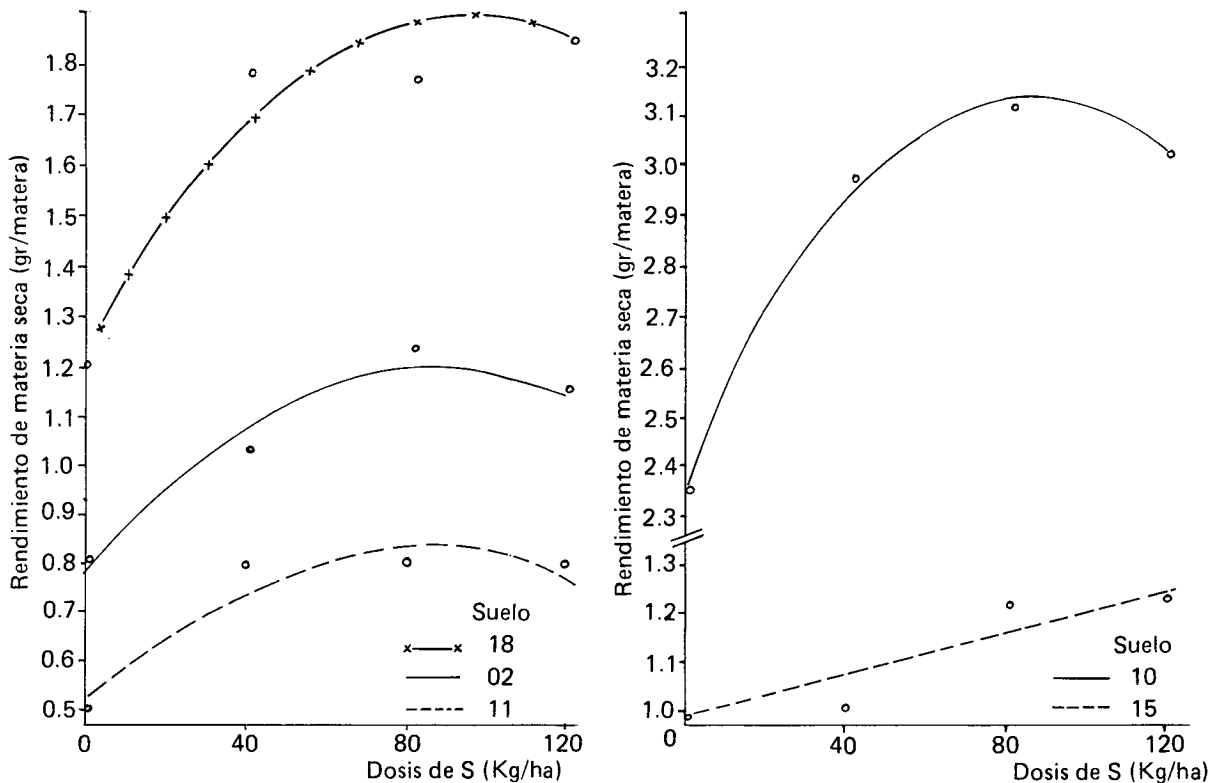


Figura 19. Efecto de la fertilización con yeso sobre el rendimiento de materia seca de maíz en algunos suelos del Huila. (Gómez, 1981)

experimentos de invernadero encontraron respuesta positiva a la aplicación de azufre en el rendimiento de materia seca y absorción de azufre por las plantas de sorgo. Igualmente obtuvieron correlaciones positivas altamente significativas entre el rendimiento, la concentración de azufre en la planta y la absorción por la misma, con el método de extracción que utiliza la solución $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0.008 M.

Gómez (1981) en experimentos de invernadero con algunos suelos del sur del Huila encontró respuesta del maíz a la fertilización con azufre en el rendimiento de materia seca y en la absorción de dicho nutrimento por la planta (Figuras 19 y 20). El nivel crítico establecido fue de 4.1 ppm de azufre extraído con CaCl_2 . Igualmente recomienda aplicar entre 40 y 80 kg. de S/ha.

Valencia (1979) manifiesta que en algunos experimentos realizados sobre la fertilización del café con azufre no se han obtenido respuestas, esto indica buena disponibilidad de azufre en los suelos estudiados. La Federación Nacional de Algodoneros (1978) ha obtenido respuestas positivas a la fertilización con azufre del algodónero. En

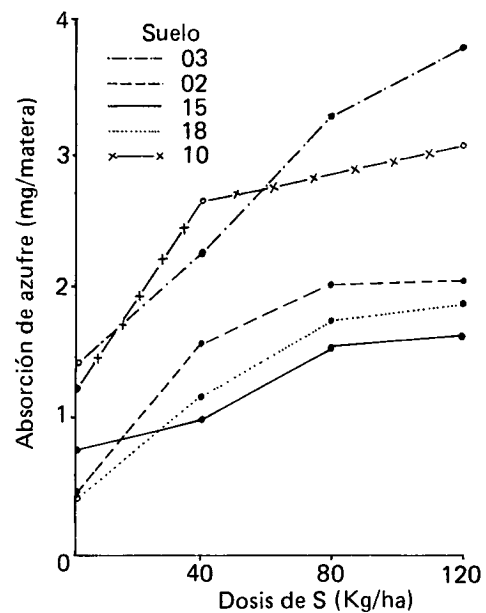


Figura 20. Efecto de la fertilización con yeso sobre la absorción de Azufre por las plantas de maíz, en algunos suelos del Huila. (Gómez, 1981)

la Figura 21 se muestra un caso en Chicoral (Tolima) y Tuluá (Valle del Cauca). Como se observa en el suelo de Chicoral la producción de algodón —semilla se incrementó notablemente por acción del azufre en todos los tratamientos. En el suelo de Tuluá el efecto del azufre fue menos intenso y la producción se incrementó sólo en los tratamientos que no tenían potasio.

Aristizábal y Hernández (1985) en suelos de Urabá no encontraron respuesta significativa del maíz en invernadero a las aplicaciones de azufre, no obstante que el contenido de azufre extraído con $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0.008 M era de 7.8 ppm en dichos suelos.

Otro aspecto que merece atención es el relacionado con el mejor comportamiento agronómico del sulfato de

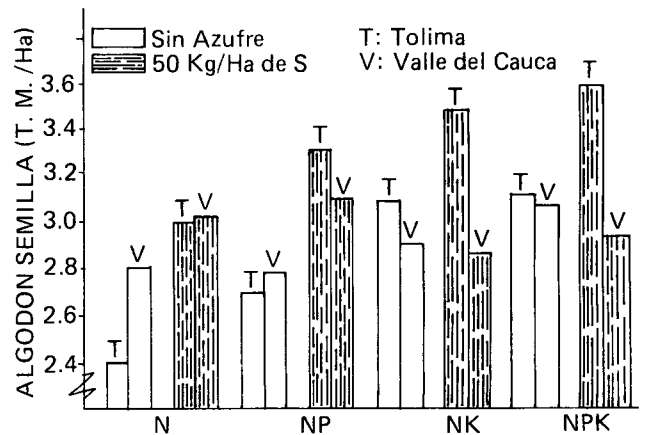


Figura 21. Efecto de la Fertilización con Azufre del Algodonero en Chicoral (Tolima) y Tuluá (Valle). Tomado de Federación de Algodoneros (1978)

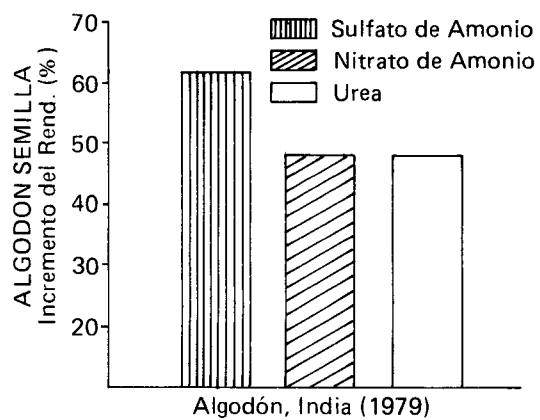
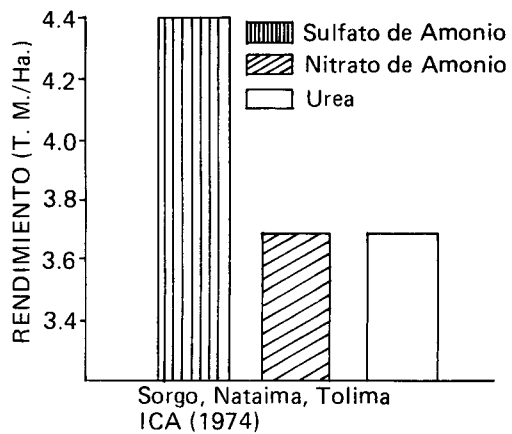
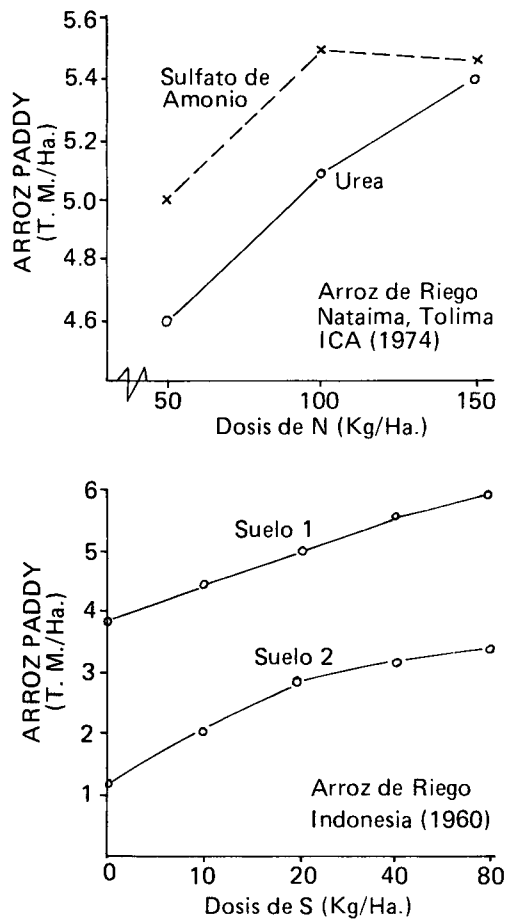


Figura 22. Respuesta de algunos cultivos a las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados y Azufre en Colombia y otros países. (Guerrero, 1983)

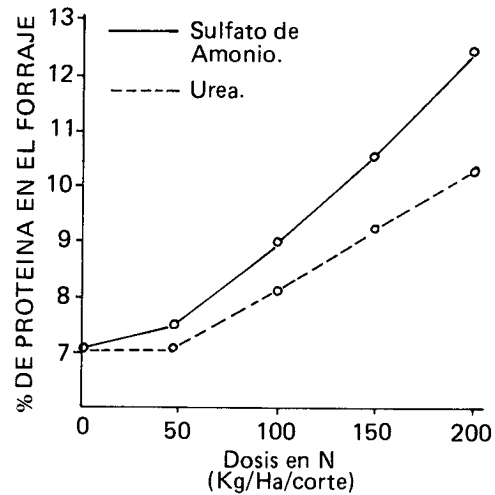
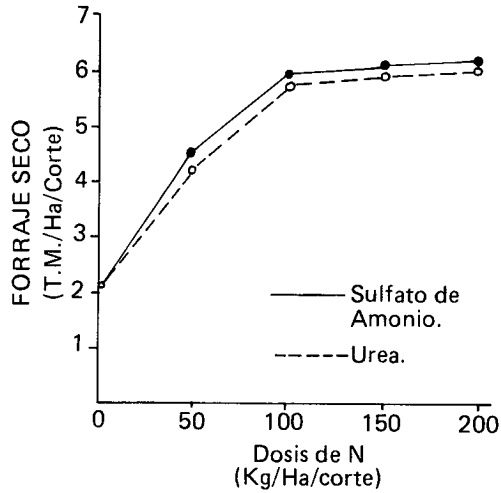


Figura 23. Respuesta del pasto pangola a la fertilización nitrogenada con Urea y Sulfato de Amonio. Promedio de 25 cortes. Según Lotero (1980)

amonio comparado con otras fuentes nitrogenadas. La Federación de Algodoneros (1978) afirma que en la mayoría de suelos algodonereros del país el sulfato de amonio ha mostrado un mejor efecto que las otras fuentes nitrogenadas. En otros cultivos se han obtenido resultados similares, tal como se muestra en la Figura 22. El efecto es más notorio en cultivos de arroz en inundación, en diferentes países. Parte de este comportamiento puede explicarse en muchos casos por el suministro de azufre en suelos deficientes.

También se ha comprobado la acción benéfica del sulfato de amonio en la calidad del forraje. Así los resultados mostrados por Lotero (1980) en la Figura 23 indican cómo, si bien el sulfato de amonio no fue determinante de un mayor rendimiento de forraje en el pasto Pangola, sí causó un incremento notable del contenido de proteína en el forraje, comparado con la úrea.

En otro campo de investigación, Martínez (1983) trabajó

con algunos suelos de diferentes regiones del país y encontró correlaciones positivas y altamente significativas entre la adsorción de azufre y el contenido de óxidos de hierro y aluminio en el suelo.

Por su parte, Zapata y Munévar (1985) encontraron que la aplicación de azufre a suelos de la serie Bacatá (Distrandept típico) causó aumentos notables en la tasa de mineralización del nitrógeno y del carbono orgánicos, lo cual se refleja en un mayor rendimiento de materia seca.

De acuerdo con la revisión anterior es probable que en Colombia existan amplias zonas cuyos suelos presenten deficiencias de azufre; sin embargo, con la información existente no es posible conocer la magnitud de este problema. En consecuencia debe continuarse con programas de investigación sobre el azufre, enfocándolos hacia los experimentos en campo, con diferentes cultivos y en varias zonas del país sin descuidar la investigación en invernadero y laboratorio.

8. El azufre en la recuperación de suelos sódicos y salino-sódicos

Algunos compuestos que contienen azufre son de gran utilidad como mejoradores químicos en la recuperación de suelos que presentan cantidades excesivas de sodio intercambiable. En Colombia se han encontrado algunas áreas afectadas por dicho problema en regiones como Alta y Media Guajira, Llanura del Caribe, Valle del Cauca, y Tolima (Cortés, 1982). Por consiguiente, es conveniente conocer aspectos relacionados con la recuperación de dichos suelos, para lo cual se ha tomado como base los conceptos emitidos en el "Manual de Diagnóstico y Rehabilitación de suelos salinos y sódicos" del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos.

8.1 Definición y Características

El suelo salino es aquel que contiene sales solubles en tal cantidad que alteran desfavorablemente su productividad. De igual manera, los suelos sódicos pueden definirse en términos del efecto del sodio intercambiable en su productividad. Existen otros suelos que contienen a la vez un exceso de sales solubles y de sodio intercambiable y se denominan "Suelos salino-sódicos".

Los suelos sódicos se caracterizan por presentar un porcentaje de sodio intercambiable superior a 15 y la conductividad eléctrica del extracto de saturación es menor de 4 mmhos/cm a 25°C. El pH generalmente varía entre 8.5 y 10. Por su parte los suelos salino-sódicos presentan una conductividad superior a 4 mmhos/cm a 25°C y más del 15% de sodio intercambiable.

En condiciones de exceso de sodio el desarrollo vegetal no es posible y las propiedades físicas y químicas del suelo se alteran completamente. El problema es mayor si además de sodio hay exceso de sales.

8.2 Recuperación de Suelos Sódicos y Salino-Sódicos

La evaluación y recuperación de suelos sódicos es objeto de estudios especiales. Aquí sólo se mencionan las posibilidades en forma general. El tipo y la cantidad de mejoradores químicos a aplicar a un suelo con el fin de substituir el sodio intercambiable, depende de las características propias del suelo, de la velocidad de substitución deseada y de los factores económicos. Los mejoradores químicos utilizados son de tres tipos:

- Ácidos o sustancias formadores de ácidos: azufre, ácido sulfúrico, sulfato de hierro, sulfato de aluminio y polisulfuro de calcio.
- Sales solubles de calcio: yeso, cloruro de calcio.
- Sales de calcio de baja solubilidad: caliza molida y subproductos de la cal usada en ingenios azucareros.

La efectividad de cada mejorador depende del pH del suelo y del contenido de carbonatos de metales alcalinos térreos en el suelo. Si se considera la respuesta de los suelos alcalinos a diversos mejoradores se pueden establecer tres categorías:

Grupo 1: Suelos que contienen carbonatos de metales alcalinotérreos.

Grupo 2: Suelos con pH mayor de 7.5 y sin carbonatos de metales alcalinotérreos.

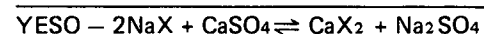
Grupo 3: Suelos sin carbonatos de metales alcalinotérreos y con pH inferior a 7.5.

Cualquiera de los mejoradores a excepción de la caliza será efectivo en suelos del grupo 1; la caliza sólo es adecuada para suelos del grupo 3. La aplicación de ácidos o formadores de ácidos a suelos de los grupos 2 y 3 puede bajar el pH en forma excesiva; por lo tanto debe tenerse cuidado en estos casos. Las reacciones químicas que se muestran posteriormente ilustran la forma como los diversos mejoradores químicos reaccionan en los diferentes grupos de suelos. En dichas ecuaciones la X representa el complejo de intercambio del suelo.

La cantidad de cada mejorador a aplicar en un suelo depende del sodio intercambiable y de la capacidad de intercambio catiónico. En la Tabla 15 se presentan las cantidades de yeso y de azufre necesarias para substituir las cantidades indicadas de sodio intercambiable.

Reacciones químicas de los diversos mejoradores en los grupos de suelos mencionados.

Grupo 1. Suelos que contienen carbonatos alcalinotérreos



AZUFRE.

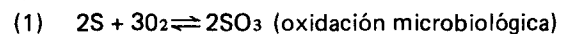


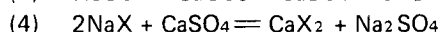
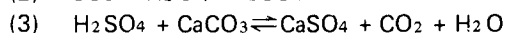
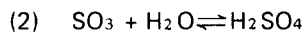
Tabla 15. Cantidades de Yeso y Azufre necesarias para substituir las cantidades indicadas de Sodio intercambiable.

Sodio Intercambiable me/100 gr. de suelo	Yeso: ¹ (CaSO ₄ · 2H ₂ O)		Azufre (S)	
	Toneladas/ hectárea- 30 cm (²)	Toneladas/ hectárea- 15 cm (³)	Toneladas/ hectárea- 30 cm (²)	Toneladas/ hectárea- 15 cm (³)
1	4.2	2.2	0.89	0.40
2	8.8	4.4	1.78	0.80
3	12.6	6.7	2.67	1.20
4	16.8	8.9	3.56	1.60
5	21.0	11.1	4.45	2.00
6	25.2	13.3	5.34	2.40
7	29.4	15.5	6.23	2.80
8	33.6	17.7	7.12	3.20
9	37.8	20.0	8.01	3.60
10	42.0	22.2	8.90	4.00

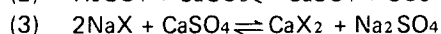
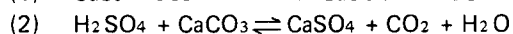
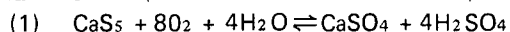
¹ Las cantidades de yeso se dan con aproximación de 0.1 tonelada.

² Una hectárea-30 cm de suelo pesa aproximadamente 4.000.000 de kilogramos.

³ Una hectárea-15 cm de suelo pesa aproximadamente 2.000.000 de kilogramos.



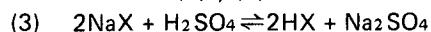
CAL-AZUFRE (POLISULFURO DE CALCIO).



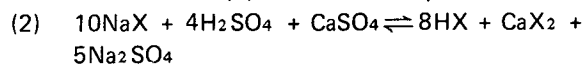
Grupo 2. Suelos que no contienen carbonatos alcalinotérricos, con pH de 7.5 o más alto

YESO – Igual que en Grupo 1.

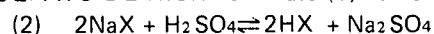
AZUFRE – Pasos (1) y (2) como en el Grupo 1.



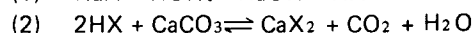
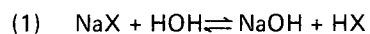
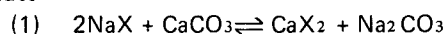
CAL-AZUFRE – Paso (1) como en el Grupo 1.



SULFATO DE HIERRO – Paso (1) como en el Grupo 1.



CALIZA – Kelley y Brown (1934) sugieren dos posibilidades:



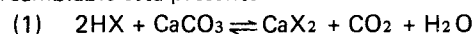
Grupo 3. Suelos que no contienen carbonatos alcalinotérricos; con pH menor de 7.5

YESO – Igual que en los Grupos 1 y 2

CAL- AZUFRE – Igual que en el Grupo 2

SULFATO DE HIERRO – Igual que en el Grupo 2

CALIZA – Igual que en el Grupo 2 y si el hidrógeno intercambiable está presente:



9. Conclusiones

El azufre es un constituyente esencial de las proteínas y de algunas vitaminas, y participa en varios procesos metabólicos dentro de la planta; por consiguiente su deficiencia afecta negativamente no sólo al rendimiento sino también a la calidad de las cosechas.

En la zona tropical existen extensas áreas cuyos suelos presentan deficiencias de azufre, por lo cual se han obtenido numerosas respuestas positivas de varios cultivos a la fertilización con dicho nutrimento. Como ejemplos de las respuestas obtenidas se citan las siguientes: aumento del rendimiento en muchos cultivos; disminución de las concentraciones tóxicas de nitratos en algunos pastos; incremento del contenido de proteína en cereales y en forrajes; balance adecuado de los aminoácidos en productos alimenticios y aumento del contenido de aceite en las semillas de algunas oleaginosas. Además, debe destacarse la importancia de algunos compuestos de azufre en la recuperación de suelos sódicos y salino-sódicos.

En la actualidad se tienen evidencias de que en el trópico

el área con deficiencias de azufre está aumentando, debido principalmente a la disminución en el uso de fertilizantes nitrogenados y fosforados portadores de dicho nutrimento y a los bajos contenidos de azufre en muchos suelos.

En Colombia se han efectuado algunas investigaciones, principalmente en condiciones de invernadero, y se han obtenido respuestas positivas a la aplicación de azufre en algunos cultivos; es probable, por lo tanto, que existan áreas deficientes en dicho nutrimento. No obstante, la poca información existente no permite evaluar la magnitud de dicho problema.

De acuerdo con lo anterior, es necesario implementar programas de investigación sobre el azufre en diferentes regiones del país y con varios cultivos, evaluando parámetros de rendimiento y de calidad de las cosechas. Estas investigaciones deberán enfocarse hacia la experimentación en campo sin descuidar la de invernadero y laboratorio.

10. Bibliografía

1. ALLAWAY, W. H.; THOMPSON, J. F. 1966. Sulphur in the nutrition of plants and animals. *Soil Sci.* 101:240-247.
2. ANDREW, C. S. 1977. The effect of sulphur on the growth, sulphur and nitrogen concentrations, and critical sulphur concentrations of some tropical and temperate pasture legumes. *Aust. J. Agric. Res.* 28:807-820.
3. ARISTIZABAL, M. I.; HERNANDEZ, A. 1985. Respuesta de Suelos de Urabá a la Aplicación de Azufre. Tesis de Grado. Facultad de Agronomía, U. Nacional. Medellín, sp.
4. AYALA, L. H.; GUERRERO, R.; GAMBOA, J. 1973. Estudio del Azufre en algunos suelos de Nariño y Putumayo. *Anales de Edafología y Agrobiología.* 32:401-416.
5. AYLMOORE, L. A.; KAVIN, M.; QUIRK, J. P. 1967. Adsorption and desorption of sulphate ions by soil constituents. *Soil Sci.* 103:10-15.
6. BARROW, N. J. 1961. Studies on the mineralization of sulphur from soil organic matter. *Aust. J. Agric. Res.* 12: 306-319.
7. _____, 1969. Effects of adsorption of sulphate by soils on the amount of sulphate present and its availability to plants. *Soil Sci.* 108:193-201.
8. BEATON, J. A.; BURNS, G. R. 1968. Determination of Sulphur in soils and plant material. The Sulphur Institute, Technical Bulletin No. 14, Washington, 56 p.
9. BLAIR, G. 1979. Sulphur in the tropics. International Fertilizer Development Center (IFDC), Technical Bulletin T-12. Muscle Shoals, Alabama. 69 p.
10. BORNEMISZA, E.; LLANOS, R. 1967. Sulphate movement adsorption and desorption in tree Costa Rican soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 31:356-360.
11. BROMFIELD, A. R. 1972. Sulphur in Northern Nigerian Soils. *J. Agric. Sci.* 78:465-470.
12. BURBANO, H. 1973. Metabolismo del azufre en suelos agrícolas de Nicaragua. Tesis M. Sc. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica. 92 p.
13. BURNS, G. R. 1967. Oxidation of sulphur in Soils. The Sulphur Institute. Technical Bulletin No. 13. Washington, 41 p.

14. CASTILLO, E.; LORA, S. R. 1985. Disponibilidad de azufre y magnesio en algunos suelos de la Cuenca del Río Suárez. En: IX Congreso Latinoamericano y III Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Resúmenes. Cali, Agosto 26-30.
15. COLEMAN, R. 1966. The importance of sulphur as a plant nutrient in world crop production. *Soil Sci.* 101:230-239.
16. CORTES, L. A. 1982. Geografía de los Suelos de Colombia. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, 161 p.
17. CHANG, N. L.; THOMAS, G. W. 1963. A suggested mechanism for sulphate adsorption by soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27:281-283.
18. CHAO, T.; HARVARD, M. E.; FANG, S. C. 1962. Soil constituents and properties in the adsorption of sulphate ions. *Soil Sci.* 94:276-283.
19. DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE LOS ESTADOS UNIDOS; LABORATORIO DE SALINIDAD. 1977. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Limusa, México, 172 p.
20. DEVLIN, R. M. 1970. Fisiología vegetal. Traducción de Xavier Llimona. Omega, Barcelona, 614 p.
21. DAIGGER, L. A.; FOX, R. L. 1971. Nitrogen and Sulphur Nutrition of Sweet Corn in relation to fertilization and water composition. *Agron. J.* 63:729-730.
22. DIJSHOORN, W.; WIJK, A. L. van. 1967. The Sulphur requirements of plants as evidence by the sulphur - nitrogen ratio in the organic matter. A review of published data. - *Plant Soil*, 26:129-157.
23. ENSMINGER, L. E.; FRENEY, J. R. 1966. Diagnostic techniques for determining sulphur deficiencies in crops and soils *Soil Sci.* 101:283-288.
24. FALLER, N. 1971. Effects of atmospheric SO₂ on plants. *The Sulphur Inst. J.* 6:5-7.
25. FASSBENDER, H. W. 1980. Química de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, San José, Costa Rica, 398 p.
26. FEDERACION NACIONAL DE ALGODONEROS. 1978. Bases técnicas para el cultivo del algodón en Colombia. FEDERACION NACIONAL DE ALGODONEROS, Bogotá, 452 p.
27. FRENEY, J. R.; SPENCER, K. 1960. Soil Sulphate changes in the presence and absence of growing plants. *Aust. J. Agric. Res.* 11:339-341.
28. _____; BARROW, H. J.; SPENCER, K. 1962. A review of certain aspects of sulphur as a soil constituent and plant nutrient. *Plant Soil*, 17:295-308.
29. _____; STEVENSON, F. 1966. Organic Sulphur transformations in soil. *Soil Sci.* 101:307-316.
30. _____; MELVILLE, G. E.; WILLIAMS, C. H. 1971. Soil Organic matter fractions as sources of plant available sulphur. *Soil Biol. Biochem.* 3:133-141.
31. _____; STEVENSON, F. L.; BEAVERS, A. H. 1972. Sulphur containing amino acids in soil hydrolysates *Soil Sci.* 114:468-476.
32. GARAVITO, N. F. 1979. Propiedades químicas de los suelos. 2 ed. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 322 p.
33. GOMEZ, C. 1981. Caracterización y disponibilidad de azufre en suelos del sur del Huila. Tesis M. SC. Universidad Nacional - Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá, 100 p.
34. GONZALEZ, G. 1983. Caracterización del azufre y su disponibilidad relacionada con los contenidos de óxidos de hierro y aluminio en algunos suelos del Meta. Tesis. Departamento de Química. U. Nacional, Bogotá, 80 p.
35. GREGORY, J. R. 1984. Urea - sulphuric acid shows promise as fertilizer and in soil and water Treatment. *Sulphur in Agric.* 8:15-16.
36. GUERRERO, R. R.; BURBANO, O. H. 1979. Fracciones de azufre y niveles críticos de disponibilidad para la planta en suelos de los Llanos Orientales y la Sabana de Bogotá. *Suelos Ecuatoriales*, X: 232-244.
37. _____ . 1983. Los fertilizantes químicos, propiedades y comportamiento agronómico. *Monómeros Colombo-Venezolanos*. Bogotá, 54 p.
38. HAGSTROM, G. R. 1981. Properties and uses of Sulphur containing fertilizer materials. En: Primer Simposio sobre el uso del azufre para el desarrollo y modernización de la agricultura en América Latina. México, sp.
39. HARVARD, M. E.; CHAO, T. T.; CHANG, S. C. 1962. The sulphur status and sulphur supplying power of Oregon Soils. *Agron. J.* 54:101-106.
40. ISMUNADJI, M.; ZULKARNAINI. J. 1978. Sulphur deficiency of lowland rice in Indonesia. *Sulphur in Agric.* 2:17-19.
41. KAMPRATH, E. J. 1968. Sulphur reactions and availability in Highly weathered soils. *The Sulphur Inst. J.* 4:7-9.
42. _____; NELSON, W. L.; FITTS, J. W. 1956. The effect of pH, sulphate and phosphate concentrations on the adsorption of sulphate by soils. *Soil Sci. Soc Amer. Proc.* 20:463-466.
43. KORKMAN, J. 1981. Sulphur utilization in cultivated soils. En: Primer simposio sobre el uso del azufre para el desarrollo y modernización de la Agricultura en América Latina. México, sp.

44. LOTERO, C. J. 1980. Fertilización de pastos y forrajes. En: Suelos y Fertilización de Cultivos, Medellín. ICA, Compendio No. 38, p. 359-385.
45. MALAVOLTA, E. 1982. Nitrogenio e enxofre nos solos e culturas Brasileiras. Centro de Pesquisa e promocao de sulfato de amonio. Boletim Técnico 1; Sao Paulo. 59 p.
46. _____, 1984. Efeitos de doses e fontes de enxofre en culturas de interesse económico. Centro de Pesquisa e promocao de Sulfato de Amonio. Boletim Técnico 4. Sao Paulo. 60 p.
47. MARTINEZ, O. C. 1983. Efecto de la textura y características químicas sobre las diferentes formas de azufre en algunos suelos de Colombia. Tesis de grado. Departamento de Química. U. Nacional. Bogotá, 80 p.
48. MUNEVAR, F.; ROZO, E. de. 1982. Influencia del azufre en el rendimiento de la mezcla de Ryegrass y trébol blanco inoculado con Rhizobium en un Andosol de la Sabana de Bogotá. Suelos Ecuatoriales. XII: 160-168.
49. MUÑOZ, R. A. 1980. Características de los suelos y la fertilización de los cultivos de maíz, fríjol, yuca, caña panelera y plátano en Antioquia. En: Suelos y Fertilización de Cultivos. ICA. Compendio No. 38, Medellín p. 419-465.
50. MURPHY, M. D.; BROGAN, J. C. 1981. Predicting sulphur deficiency by soil and plant analysis. En: Primer Simposio sobre el uso del azufre para el desarrollo y modernización de la agricultura en América Latina, México, sp.
51. NAGESWAR, N. R.; BIDDAPPA, C. C.; SARKUNAN, V. 1980. Sulphur deficiency and toxicity in Rice. Sulphur in Agric. 4:25-26.
52. NEPTUNE, A. M.; TABATABAI, M. A.; HANWAY, J. J. 1975. Sulphur fractions and carbon-nitrogen Phosphorus-sulphure relationships in some Brazilian and Iowa soils. Soil Sci. Am. proc. 39:51-55.
53. PEDRAZA, L. A.; LORA, R. 1974. Disponibilidad del azufre para las plantas en dos suelos de los Llanos Orientales de Colombia. Suplemento Revista ICA. IX: 77-112.
54. PLATOU, J. S.; IRISH, R. 1982. The fourth major nutrient. The Sulphur Institute, Washington, 32 p.
55. RENEAU, R. B. 1981. Corn response to sulphur application. En: Primer Simposio sobre el uso del azufre para el desarrollo y modernización de la agricultura en América Latina. México, sp.
56. STEWART, B. A. 1969. N: S ratios. A guideline to sulphur needs. Sulphur Inst. J. 5:12-15.
57. _____; PORTER, L. K.; VIETS, F. G. 1966. Effect of sulphur content of straws on the rate of decomposition and plant growth. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30:355-358.
58. SWIFT, R. S. 1985. Mineralization and Immobilization of Sulphur in Soil. Sulphur In Agric. 9:20-24.
59. TANDON, H. L. S. 1985. Importance of Sulphur in Indian Agriculture. Sulphur in Agric. 9:8-12.
60. TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. 1975. Soil Fertility and fertilizers, 3 ed. Mac Millan Co.; New York. 694 p.
61. _____; PLATOU, J. S. 1981. The importance of sulphur in tropical Agriculture. En: Primer Simposio sobre el uso del azufre para el desarrollo y modernización de la Agricultura en América Latina. México, sp.
62. VALENCIA, A. G. 1979. Respuesta al calcio, magnesio y azufre en cultivos de clima medio. El caso del cafeto. Suelos Ecuatoriales. X: 186-195.
63. WANG, C. H.; LIEM, T. H.; MIKKELSEN, A. S. 1977. Sulphur deficiency in lower Amazon basin. Sulphur In Agric. 1:16-17.
64. _____, 1978. Sulphur fertilization of rice. Sulphur in Agric. 2:13-16.
65. WILLIAMS, C. H. 1967. Some factors affecting the mineralization of organic Sulphur in Soil. Plant Soil. 26:205-223.
66. _____; STEINBERGS, G. 1964. The evaluation of plant, available sulphur in soils. Plant Soil. 21:50-62.
67. WRIGLEY, C. W.; CROS, D. L. du; MOSS, H. J.; RANDALL, P. J. 1984. Effect of sulphur deficiency on wheat quality. Sulphur In Agric. 8:2-7.
68. ZAPATA, A.; MUNEVAR, F. 1985. Efecto del azufre en la mineralización del carbono y nitrógeno de un Andosol de Cundinamarca. En: IX Congreso Latinoamericano y III Congreso Colombiano de la ciencia del suelo. Resúmenes. Cali, Agosto, 26-30.
69. ZUND, Z. F.; MURDOCK, L. W. 1978. Effect of sulphur on early growth of plants. Sulphur In Agric. 2:6-8.