

EFECTO DE LA APLICACIÓN DE AZUFRE EN LOS CULTIVOS DE CEBOLLA Y PAPA BAJO CONDICIONES DE CAMPO

Juan Guerrero Barrantes (*)

Lily Tello Peramas (**)

SUMMARY

Under field at Majes Valley (Arequipa) conditions, factorial experiments were carried out in order to evaluate the effect of sulfur (S) indirectly applied with NPK fertilizers containing this secondary nutrient as $\text{SO}_4^{=}$ such as $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_2SO_4 and Superfos-24 (made with H_2SO_4) compared to NPK fertilizers without S such as $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, KCl, TSP (Triple superphosphate made with H_3PO_4).

Therefore the factorial was formed by 2 sources of N x 2 of P205 x 2 of K20 completing 8 treatments by 3 replications. In order to have an idea of NPK content in the experimental soil additional treatments have been added.

On the other hand two crops have been used as indicators of S consumers (potato and onion as a normal and a higher consumer respectively).

The highest yield by red onion (69,4 t) has been obtained using fertilizers containing S such as $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, SF-24 and K_2SO_4 because onion is considered as a high consumer of S.

RESUMEN

Bajo condiciones de campo del Valle de Majes (Arequipa) se realizaron experimentos factoriales con el propósito de evaluar el efecto del azufre (S) aplicado indirectamente con fertilizantes NPK donde el contenido de este nutriente secundario esencial está como $\text{SO}_4^{=}$ presente en el $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_2SO_4 y Superfos-24 (hecho con H_2SO_4) comparado con fertilizantes que no contienen S como la $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$, KCl y superfosfato triple (hecho con H_3PO_4).

Por consiguiente el factorial estuvo formado por 2 fuentes de N x 2 de P_2O_5 x 2 de K_2O completando 8 tratamientos por 3 repeticiones. Para tener una idea del contenido de NPK en los suelos experimentales se agregaron tratamientos adicionales.

* Profesor Principal, Dpto. Académico de Suelos

** Jefe de Prácticas, Dpto. Académico de Suelos

Por otra parte dos cultivos fueron usados como indicadores del consumo de S (papa y cebolla como un nonnal y alto consumidor respectivamente).

En el Valle de Majes (Arequipa) el más alto rendimiento de cebolla roja (69,4 t/ha) se obtuvo utilizando fertilizantes conteniendo S como el $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, SF-24 y K_2SO_4 porque la cebolla está considerado como un buen consumidor de S.

INTRODUCCION

El azufre es un macronutriente secundario esencial necesario para la formación de aminoácidos, vitaminas, enzimas, etc.

El incremento geométrico del uso de Los fertilizantes nitrofosfopotásicos ha sido el factor determinante en el aumento de la productividad y producción de alimento en el mundo durante las dos últimas décadas. La inclusión del azufre ha jugado un rol técnico y comercial en la fabricación de los fertilizantes nitrogenados, fosforados y potásicos razón por la cual de 1975 a 1985 el consumo de azufre en el mundo se ha incrementado de 19,6 a 57 millones de toneladas.

La tendencia de la agricultura moderna se dirige hacia necesidades mayores de azufre sobre la base de cultivos más productivos, agricultura más intensiva y productos agroquímicos, especialmente fertilizantes, con menores cantidades de este elemento. Como resultado, son cada día más comunes las deficiencias de este elemento y es más común la respuesta a fertilizantes con azufre.

Los suelos de acuerdo a sus características funcionan como bancos de azufre, entre otros elementos, obviamente todo el azufre requerido por los cultivos no puede ser dado por el suelo, lluvia, agua de riego ni materia orgánica pero si puede ser dado por aplicación vía fertilizantes que lo contengan.

Nuestro país ya se encuentra en lista de países con suelos con problemas de deficiencia en azufre, debido a que se están consumiendo fertilizantes concentrados conteniendo poco o nada de azufre en su composición. Por otra parte los suelos costeros son de bajo contenido de materia orgánica y/o con textura arenosa, razón por la cual responden positivamente ante una aplicación de azufre vía fertilizantes que lo contengan o materia orgánica o flor de azufre.

En nuestro país se han realizado pocos estudios al respecto a pesar de que el azufre podría llegar a ser un elemento limitante en una agricultura empresarial de alta productividad. Por ello, es importante estudiar como influiría el azufre en el rendimiento en cantidad, calidad de los cultivos de la costa, sierra y selva bajo diferentes condiciones de clima, suelo, cultivo y tecnología. Por ejemplo se ha llegado a determinar que la producción de una tonelada de cebolla extrae aproximadamente 1.1 kg. de azufre y producir una tonelada de papa extrae 0,8 kg. de azufre; con estas consideraciones se planteó el siguiente objetivo:

OBJETIVO

Evaluar el efecto de fuentes y niveles de los fertilizantes nitrofosfopotásicos como una fuente indirecta de azufre en cultivos exigentes (cebolla) y poco exigentes (papa) bajo condiciones de invernadero y de campo.

REVISIÓN DE LITERATURA

El azufre en el suelo

El azufre en las rocas - suelos

El contenido total de azufre en las rocas ígneas y metamórficas varia entre 300 y 700 ppm, correspondiendo los valores más elevados a las rocas máficas. En las rocas ígneas suele presentarse en forma de sulfuro, especialmente en las de reacción básica, y al meteorizarse las rocas el azufre se libera en forma de sulfato. Los sulfatos también se presentan precipitados como impurezas en algunas rocas calcáreas, en las concreciones de carbonato cálcico y en el coral. Por estos motivos las concentraciones de azufre en el suelo presentan gran variabilidad. Se citan valores tan bajos como 0.2-0.3 ppm en suelos arenosos y tan altos como 3-5% en suelos con alto contenido de material orgánico como mariscas. En la rehabilitación de suelos con sulfuros, la oxidación a sulfato origina fuerte acidificación, a menos que el suelo sea rico en carbonato cálcico (Burbano y Blasco, 1975; Fassbender, 1982; Gros, 1981).

Contenido total de azufre en el suelo

El contenido de azufre total en los suelos varia considerablemente pudiendo encontrarse valores que van desde 30 a 50 ppm hasta tan altos como 400 ppm y posiblemente mucho más altos en suelos de regiones áridas debido a la acumulación de sulfatos o al ascenso de aguas subterráneas ricas en sulfatos o como resultado del contenido de sulfatos en el agua de riego aplicada; los principales compuestos que se acumulan son el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o la anhidrita (CaSO_4) y la epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), en cantidades menores se encuentran minerales poco solubles, como los sulfuros: esfalerita (ZnS) y calcopirita (CuFeS_2) (Fassbender, 1982). Se citan valores promedio de azufre total en las capas arables de suelos de la región templada que van desde 200 ppm en Ultisoles hasta 500 ppm en Mollisoles. Los suelos de regiones templadas tienen generalmente un contenido mas alto de azufre cuanto mayor es el contenido de materia orgánica; por otro lado, los suelos tropicales con valores altos de materia orgánica de alófono tienen cantidades altas de acidez total con un promedio de dos tercios de azufre total como inorgánicos en suelos de Centroamérica (Borniémisza, 1959; Fassbender, 1982), por ejemplo un Eutrodept de Hawai con 1280 ppm en la capa arable (Mengel y Kirby, 1982; Quevedo, s/a).

El ión sulfato está presente en la solución suelo o es adsorbido por los coloides del suelo. Los sulfatos de la solución suelo están en equilibrio con las formas de azufre de la fase sólida (arcillas silicatadas y arcillas de óxidos e hidroxidos de fierro y aluminio) así como con sulfatos sólidos de distinto producto de solubilidad y los aportes de la mineralización del azufre de la materia organica. El ión sulfato debido a que no se adsorbe muy fuertemente en el suelo y a la solubilidad de muchas de sus sales, tiene gran movilidad en la solución del suelo y puede lixiviarse casi tan fácilmente como el nitrato. Dependiendo de la intensidad de la lluvia de la textura del suelo, las cantidades que pueden perderse por lavado serían del orden de los 100 Kg S ha⁻¹ (Urbano y Rojo, 1992).

Procesos dinámicos de transformación del azufre.

Ciclo del azufre en los suelos.- Los procesos dinámicos del azufre son similares a los del nitrógeno. En el ciclo del azufre se observan transformaciones debidas a procesos que ocurren principalmente por la acción de diferentes microorganismos. En forma semejante que para otros elementos, se puede considerar a la solución como fuente principal de la que las plantas o microorganismos absorben el azufre. Los residuos de todos ellos son mineralizados por microorganismos, produciendo azufre inorgánico oxidado o reducido. La mineralización del azufre orgánico sigue un esquema similar al del nitrógeno orgánico. Se cree que cuando se libera H_2S , este es rápidamente oxidado en sulfato.

El lavado de los suelos genera una importante pérdida de azufre. Pearson y colaboradores en 1962 observaron que en los de Puerto Rico, un 90% de los cationes lavados se perdió con sulfato como anión acompañante; mientras que los nitratos y cloruros sólo contribuyeron con un seis y uno por ciento respectivamente. En regiones industriales, según Coleman (1966), el azufre en las lluvias es fuente de apreciables cantidades con niveles que generalmente exceden $20 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; en general, en estas regiones no se observan deficiencias de azufre. Para el caso de los Andes Occidentales de Venezuela, Steinhardt y Fassbender (1979) informan sobre la presencia de apenas $11.8 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de azufre en las lluvias, un contenido relativamente alto para regiones tropicales, fenómeno influido posiblemente por las zonas con instalaciones petroquímicas. Kamprath y Till (1983) estiman que la lluvia es fuente de menos de $5 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ del azufre, lo que no cubre las necesidades de una agricultura intensiva.

Oxidación y reducción.- Los procesos de oxidación y reducción del azufre en los suelos son importantes en la dinámica de este elemento y, en general, para el balance redox del suelo. El azufre se reduce en condiciones anaeróbicas y se oxida en condiciones aeróbicas.

Movimiento y adsorción de sulfatos.- La adsorción de sulfatos es un proceso importante en los suelos ácidos, particularmente en los caoliniticos. Gran parte de la adsorción de sulfatos ocurre en sitios con carga positiva (Probert y Samosir, 1983). En este proceso, al adsorberse el sulfato se liberan OH, como lo demostraron Chang y Thomas (1963) para el caso de Estados Unidos; Bomemisza y Llanos para Costa Rica (1967) y Couto, Lathwell y Bouldin para los Oxisoles de Brasil (1979) citados por Bornemisza (1990).

Para que se de una adsorción apreciable del sulfato, se requieren tres condiciones:

- la presencia de superficies que reaccionen
- la existencia de un ambiente químico favorable y
- la existencia de sulfato en la solución del suelo

Las cantidades de sulfato adsorbido pueden ser muy altas, especialmente cuando se abona fuertemente y cuando la concentración de sesquióxidos en el suelo es alta (Fox et al, 1983).

El movimiento del sulfato es fomentado por fosfatos y por el encalado (Chao et al, 1962); suelos altos en óxidos libres de Fe y Al son muy buenos retenedores de sulfatos.

Se han encontrado correlaciones positivas entre la adsorción con el contenido de materia orgánica, con óxidos de hierro y de aluminio; se hallaron correlaciones negativas con la suma de cationes intercambiables y con el calcio de estos suelos; también se encontró que la retención varía según el tipo de arcilla: caolinita > illita > bentonita (Malavolta, 1976; Tisdale y Nelson, 1977).

El movimiento de sulfatos en los suelos es reducido, aunque supera al del fosfato. Existen diferencias entre los tipos de suelos y una dependencia de la adsorción y de la concentración (Fox et al, 1983).

Interacción del azufre con otros elementos

La interacción más importante es N:S, se sabe que aplicando juntos Los dos elementos tienen una acción sinérgica, es decir la acción conjunta resulta en un mejor aprovechamiento de ambos elementos que si se les hubiera aplicado por separado. Sin embargo, si se suministran cantidades apreciables de uno de los dos elementos y el otro es escaso, las diferencias serán fuertes. Esto se entiende considerando que tanto el nitrógeno como el azufre son partes fundamentales de las proteínas (Bornemisza, 1990; Kanwar y Mudahar, 1986).

Otra interacción de gran importancia es la de P:S; aquí debe considerarse el efecto desplazador del fosfato, especialmente si se aplica en grandes cantidades como es común para suelos volcánicos. Esto resultará en un aumento del lavado del sulfato y puede incluso conducir a deficiencias donde no se las observa previamente, Kanwar y Mudahar (1986), indican que la aplicación conjunta de S y P resultó en efectos diferentes en caso de distintos cultivos, por ejemplo, interacciones positivas para algodón, soya, arroz y trigo, mientras que el efecto fue diferente en caso de distintos cultivos, por ejemplo, interacciones positivas para algodón, soya, arroz y trigo, mientras que el efecto fue antagonístico para lentejas y leguminosas.

En general, hay más evidencia en India que indica que el abonamiento con fósforo dificulta la absorción de sulfato. Esta absorción es muy importante para los trópicos de América, donde está aumentando apreciablemente el uso de fosfato debido a la deficiencia común de este elemento. Como resultado, el aprovechamiento del azufre se vuelve menos eficiente y se presentan más deficiencias (Bornemisza, 1990; Kanwar y Mudahar, 1986).

Se ha informado sobre interacciones positivas azufre-potasio para an^{-} , $^{-}$, pero investigaciones sobre interacciones de Ca:S y Mg: S no han indicado efecto alguno.

Bornemisza, 1990; Kanwar y Mudahar, 1986; han mencionado que las interacciones de sulfato con molibdeno y sulfato con selenato son negativas.

Fertilizantes que contienen azufre

Los fertilizantes que contienen SO_4^{2-} tienen, generalmente, un efecto residual corto pero pueden mantenerlo en suelos ácidos que adsorben los iones sulfato, o cuando la lixiviación es pequeña (Bromfield, 1973; Jones, 1968). Los fertilizantes que contienen azufre elemental son, generalmente, algo menos activos, pero su efecto es más prolongado debido a la insolubilidad del azufre (Jones, 1996).

Flor de azufre

A pesar de que es la fuente más concentrada del elemento, se utiliza poco azufre elemental como abono debido a que el azufre en polvo fino es un producto incómodo para manejar e incluso presenta un cierto riesgo de fuego y hasta de explosión (Hagstrom, 1986). Aún con estos inconvenientes, considerando las ventajas del producto y su fácil transporte, se han realizado una serie de investigaciones sobre el comportamiento del azufre elemento en suelos (Li y Caldwell, 1966; Navarro y Padda, 1983; Nor y Tabatabai, 1977; Starkey, 1966). Se sabe que los microorganismos del suelo tienen un papel fundamental en la oxidación del elemento (Starkey, 1966); un aumento de la temperatura del suelo favorece la oxidación del azufre elemental, igual como el pH cercano a la neutralización (Li y Cadwell, 1996; Nor y Tabatabai, 1977); no hay información sobre la velocidad de oxidación.

En experimentos con camote en un suelo bajo en azufre, Navarro y Padda en 1983 han obtenido aumentos significativos luego de la aplicación de azufre, tanto en forma elemental como en forma de sulfato de amonio.

En experimentos con camote en un suelo bajo en azufre, Navarro y Padda en 1983 han obtenido aumentos significativos luego de la aplicación de azufre, tanto en forma elemental como en forma de sulfato de amonio.

De acuerdo con Blair (1979), el azufre elemental ha sido una de las fuentes importantes del elemento en los trópicos, aunque sea una fuente poco satisfactoria para arroz inundado. Se cree que esto se debe a la reducción y su pérdida como ácido sulfhídrico. Mucho de este material se usa también para la recuperación de suelos afectados por altos niveles de Na.

Fertilizantes con Nitrógeno y Azufre

El más conocido y utilizado es el sulfato de amonio, el cual, se obtiene en fábricas construidas para este propósito y como producto residual de diferentes procesos de la industria química, como la producción de nylon. Contiene 20.5% de N y un 240% de S (Villagarcía, 1994) calculado como elemento en forma de sulfatos. Este fertilizante se usa bastante y en grandes cantidades debido:

- 1.- contiene un total de 45% de nutrimentos;
- 2.- acidifica menos el suelo por unidad de azufre que el azufre elemental;
- 3.- es una fuente barata del azufre; ya que se vende principalmente en base del precio de N que contiene;
- 4.- suministra el S como sulfato y así en una forma inmediatamente disponible para las plantas;
- 5.- suple el N en forma de amonio, mucho menos expuesto a pérdidas que otras formas del elemento;
- 6.- se caracteriza por una baja higroscopicidad, lo que permite su almacenamiento en cualquier clima;
- 7.- se mezcla bien (Borrmemisza, 1990; Hagstrom, 1986; Villagarcía, 1994).

Fertilizantes con fósforo y azufre

Tenemos el Superfos-24 el cual es obtenido por la fábrica INDUS mediante la mezcla de ácido sulfúrico con la roca fosfatada resultando en fosfato monocalcico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] y yeso [CaSO_4] con restos de apatita hidroxidada, fosfatos de Fe y Ca, de acuerdo con la composición de la materia prima. Este fertilizante se presenta en forma granulada o pulverulenta, de solubilidad parcial en agua, poco o nada higroscópico lo que facilita su mezcla homogénea con otros fertilizantes nitrogenados y potásicos para su aplicación manual o mecanizada y de reacción neutra. Así mismo, es de acción rápida, su incorporación al suelo incrementa el contenido inicial de P_2O_5 en la solución suelo incrementando las reservas de iones fosfatos (Villagarcía, 1994; INDUS, s/a).

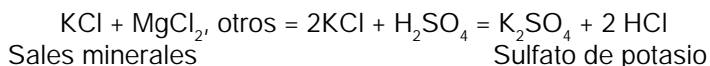
El superfos-24 contiene fósforo soluble en agua de inmediato aprovechamiento y fósforo soluble en ácidos débiles de progresiva disponibilidad con «gran efecto residual» para la nutrición fosfatada de Los cultivos subsiguientes. Su composición es: 22 a 24% de fósforo expresado como P_2O_5 ; de los cuales: 10 a 12% es soluble en agua; 10 a 12% es soluble en ácidos débiles y 2 a 4% es soluble en ácidos fuertes; además contiene 23 a 25% de calcio y 6 a 7% de azufre; es decir, un total de 53 a 55% de nutrientes minerales entre fósforo, calcio y azufre.

Otro fertilizante es el superfosfato simple, que consiste en una mezcla de fosfato monocalcico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] y yeso [$(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$] que contiene aproximadamente 8% de fósforo y de 12 a 14% de azufre. A pesar de que esta es la forma más barata de preparar un abono de fosfato soluble, por su bajo contenido de fósforo, está disminuyendo su importancia y su uso.

Fertilizantes con potasio y azufre

Entre ellos se encuentra el sulfato de potasio que es una sal neutra y una muy buena fuente de azufre, la cual comúnmente tiene 17 a 18% y de K_2O (48-52%). Para varios cultivos que toleran mal el cloruro, como el tabaco y las papas, se usa preferentemente el sulfato de potasio como fuente de este elemento. El sulfato de potasio a diferencia del cloruro de potasio, puede aplicarse en cualquier momento tanto en la siembra como en el aporque (Bornemisza, 1990; Hagstrom, 1986; Villagarcía, 1994). Para bananos, un cultivo con alta exigencia en potasio, se ha usado con buenos resultados el sulfato de potasio cuando los suelos son deficientes tanto en azufre como en potasio (Beaton, 1996).

El sulfato de potasio se obtiene a partir de las sales potásicas que contienen cloruros de potasio y magnesio. Primero se las depura y luego se les trata químicamente con cloruro de potasio puro, o del cloruro de potasio depurado se le trata con ácido sulfúrico.



Se considera que esta sal es soluble en agua y menos higroscópica que el cloruro de potasio. Por lo tanto es mejor su almacenamiento, no hay problemas de toxicidad iónica y se incorpora el azufre a Los suelos.

Otro fertilizante es el sulfato de potasio y magnesio ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$) excelente fuente de tres nutrimentos vegetales importantes. Las formas comerciales contienen alrededor de 18% de K, 11% de Mg y 22% de S (Hagstrom, 1986).

Muchos de los oligoelementos como el Zn, Cu, Mn, Ni se aplican cuando hacen falta como sulfatos. Sin embargo debido a que los niveles de requerimiento de estos elementos son bajos, las cantidades de azufre que aportan son también bajas, comúnmente inferiores a 5 Kg ha^{-1} .

El azufre en abonos orgánicos

Los residuos de las cosechas son fuentes importantes de azufre. Es bastante común que los residuos contengan más azufre que las cosechas propiamente dicha. Los estiércoles son una fuente de azufre, sin embargo la amplia bibliografía sobre estos materiales, casi no ofrece información sobre su contenido de azufre y así es difícil estimar con precisión con cuánto azufre contribuyen.

También se sabe poco sobre la velocidad de mineralización de los compuestos de azufre en la materia orgánica, lo que hace más difícil estimar el valor preciso de estos materiales. Uno de los pocos datos es el indicado por Kanwar y Mudahar (1986) y por Blair (1979), quienes señalan que una tonelada de estiércol agrega alrededor de 2 Kg de azufre; Villagarcía et. al. (1997) señalan que 1 t de estiércol en promedio aporta de 5 a 8 Kg de sulfatos. Este se mineraliza lentamente, por ello únicamente adiciones fuertes de estos materiales pueden resultar en aumentos significativos de azufre en el suelo; además, Blair (1979) indica el mismo valor para harina de huesos y la mitad para harina de residuos de maní.

Evidentemente, su lenta mineralización también reduce la pérdida del azufre de esta fuente y así resulta en un aprovechamiento bastante eficiente del poco azufre añadido. Es importante recordar que la materia orgánica adsorbe a los sulfatos, y así en suelos bien suplidos de materia orgánica, hay menos pérdidas de lavado por este anión. Aunque esta área requiere mucha experimentación se puede afirmar que la materia orgánica en el suelo ayuda a reducir los problemas de azufre. Esto es confirmado por los experimentos realizados por Villagarcía et al (1990; 1997).

Importancia del azufre en la producción de los cultivos

El azufre es uno de los macro elementos secundarios esenciales de las plantas. Los cultivos anuales con buenos rendimientos extraen entre 15 y 50 Kg S ha^{-1} , cifras similares a las extracciones de el fósforo y magnesio. Las leguminosas y las cucíferas tienen las más altas exigencias de azufre así como los árboles frutales. La importancia del azufre es similar a la del nitrógeno y el fósforo en la formación de proteínas; el azufre es un componente esencial de algunas vitaminas y enzimas. Se han detectado carencia de azufre en cultivos por todo el mundo, excepto en regiones costeras que reciben este elemento con las espumas marinas y en las proximidades de centros industriales y urbanos que pueden recibirlo procedente del SO_2 atmosférico. Debido a que desde 1970 se tiende a utilizar combustibles fósiles que desprendan menos SO_2 , y al uso cada vez más importante de fertilizantes más concentrados que contienen muy poco o nada de azufre en su composición, puede esperarse que la deficiencia de este elemento vaya en aumento (Bornemisza, 1990; Russell, 1992; Mengely Kirkby, 1982).

A menudo se observa que el azufre tiene un efecto favorable no sólo sobre el rendimiento, sino también sobre la calidad; por ejemplo ha producido un alto mejoramiento en la calidad de la cosecha en:

1. Hortalizas con marcado metabolismo de nitrógeno y proteína.
2. Hortalizas que se utilizan por el fruto y semillas.
3. Hortalizas cuyo valor depende del contenido de azúcar en la cosecha.
4. Cuando debe prestarse consideración a las propiedades de conservación o características de almacenamiento.
5. Cultivos que contienen mayor cantidad de este elemento en sus tejidos, sobretodo si crecen en terrenos de textura ligera bajos en materia orgánica.

La cebolla es uno de los cultivos que más consume el azufre, extrayendo en una cosecha de 37 t ha⁻¹ un total de 34 Kg de azufre, de éste, 22 en la cosecha y 12 en el follaje. Para reponer el azufre extraído se sugiere aplicar hasta 41 Kg S ha⁻¹ obteniéndose incrementos de hasta 19% en la cosecha (Bornemisza, 1990).

Deficiencia y toxicidad de azufre en los cultivos

Las deficiencias suelen presentarse en las regiones donde los aportes atmosféricos son inferiores a 5-10 Kg S ha⁻¹ año⁻¹ y en los casos en que el contenido de SO₄²⁻ del suelo sea muy bajo, como en los suelos muy lavados. La fuente inmediata de azufre edáfico para los cultivos son los SO₄²⁻ de la solución del suelo y esta ha de renovarse por la desorción procedente de las arcillas e hidróxidos. Se han obtenido respuestas positivas de los cultivos a los aportes de sulfatos en muchos países y, especialmente, se han comprobado diferencias notables en algunas regiones de EE.UU., Australia y Nueva Zelanda.

Como el azufre es un constituyente esencial de las proteínas, su deficiencia resulta en una inhibición de la síntesis de las mismas. Por lo tanto en los tejidos de las plantas deficientes en azufre se acumulan aminoácidos que no contienen este elemento, como la asparagina, glutamina y arginina, principalmente; se ha observado en plantas deficientes en azufre, una acumulación de amidas nitrogenadas las cuales están asociadas con un bajo contenido de azúcar, resultado de la pobre actividad fotosintética de las plantas cloróticas deficientes en azufre, por lo tanto tienen un bajo contenido de proteínas no sólo en la parte vegetativa sino también en los granos de los cereales (Beaton, 1996; Bornemisza, 1990; Fassbender, 1982; Mengel y Kirkby, 1982).

La relación N orgánico/S orgánico es muy alta en tejidos de plantas deficientes en azufre (70/1 a 80/1), comparado con los tejidos de las plantas normales; otro indicador de deficiencia de azufre en plantas es la acumulación de nitratos en sus tejidos.

En cultivos de campo las deficiencias de nitrógeno y azufre son difíciles de distinguir, por lo que debe acudir a los análisis foliares, que resultan más fiables. Las plantas deficientes en azufre son afectadas en su crecimiento, siendo los tallos más afectados que las raíces. Las plantas son rígidas y quebradizas y los tallos delgados. La formación de los cloroplastos es afectada, los síntomas de clorosis se presentan en las hojas más jóvenes. En general, la materia seca de las hojas jóvenes deben contener más del 0,15-0,20% S, aunque el valor crítico depende del cultivo y disminuye con la edad de las hojas. También se ha utilizado la relación entre N y S proteicos o, incluso más frecuentemente, entre el N y S totales. Algunos investigadores prefieren utilizar el S mineral (SO₄²⁻) presente en la planta expresado como % del azufre total; un valor superior al 20% indica un suministro adecuado. Para las gramíneas y los cereales, una relación en las hojas N total/S total superior a 14 puede indicar carencia de azufre.

Las plantas son insensibles a las altas concentraciones de sulfatos en el medio nutritivo, sólo en casos donde las concentraciones de sulfato son de alrededor de 50mM, como en algunos suelos salinos, el crecimiento de las plantas es afectado adversamente. La concentración crítica de SO_2 en la atmósfera sobre la cual los efectos tóxicos en las plantas son observadas, están en el rango de 0.5 a 0.7 $\text{mg SO}_2 \text{ m}^{-3}$.

Los síntomas de toxicidad son, una reducción del crecimiento y una coloración verde oscura en las hojas, pero estas no son específicas para un exceso de azufre, siendo más típicas para las plantas afectadas por sales. Sin embargo en concentraciones isoosmóticas, se produce un efecto más detrimental por la salinidad del sulfato que por la del cloro. Las causas de la toxicidad del SO_2 , es que el gas SO_2 y Los aniones de azufre (HSO_3^- y SO_3^{2-}) pueden acumularse y desactivan la fotofosforilación (formación de ATP).

El azufre en la nutrición de la planta

El mecanismo actual de la toma de sulfato por la planta no es entendido totalmente. Se cree que existe un mecanismo simple de absorción del SO_4^- , la selectividad del cual depende mucho de la concentración de sulfato en la solución nutritiva. Se supone que el SO_4^- es tomado por la planta mediante un proceso activo (Mengel y Kirby, 1982).

Este elemento es translocado principalmente en dirección ascendente mientras que el movimiento descendente es muy pobre y ante la deficiencia de azufre, el sulfato es translocado de las raíces y peciolo hacia las hojas jóvenes y el azufre de las hojas viejas no es proporcionado a los tejidos jóvenes lo que demuestra que la translocación no se da por flujo de masas. El sulfato es poco móvil en la planta, al igual que el calcio y los elementos menores. Por lo tanto los síntomas de deficiencia se presentan en las hojas jóvenes. Las plantas utilizan el SO_2 atmosférico, siendo este absorbido a través de los estomas y distribuido en toda la planta, para constituir los aminoácidos, proteínas y sulfatos (Mengel y Kirkby; 1982).

Luego de ser asimilado el SO_4^- , es reducido, lo cual se demuestra por las moléculas orgánicas mayores que contienen azufre, en las cuales este elemento está presente en una forma reducida. Estos compuestos orgánicos incluyen la cisteína, cistina y metionina y las proteínas que contienen estos aminoácidos.

El contenido total de azufre en los tejidos de las plantas es de 0,2 a 0,5% en la matena seca. Se conoce que el exceso de azufre absorbido por la planta es almacenado como sulfato (Mengel y Kirkby, 1982).

Rol del azufre

El azufre es un macroelemento secundario esencial para la síntesis de los aminoácidos cistina, cisteína y metionina y para la síntesis de proteínas con estos aminoácidos; también participa en la activación de enzimas proteolíticas tales como las papainazas; es constituyente de ciertas vitaminas como la biotina; se encuentra presente en los aceites de algunas especies, incrementando su contenido en cultivos tales como la soya. Esta relacionado los enlaces de disulfuro con la resistencia al frío y la sequía y la síntesis de glucósidos que dan olor a los aceites esenciales de muchas plantas como las Liliáceas y Crucíferas (The Sulphur Institute, s/a).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

Lugar de Ejecución

Los experimentos se realizaron en el departamento de Arequipa en las localidades de Bajo Cural y Revuelta-Perdida-Vítor-Cailloma.

Datos de Clima.

Esta información se obtuvo por lo observado durante la campaña y se observó una temperatura media de 19°C, una baja precipitación pluvial (alrededor de 15 mm) por lo que el sistema de manejo fue con riego por gravedad.

Características de los suelos

El análisis de caracterización de los suelos empleados fue realizado, en el Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la UNALM, usando los métodos convencionales. Los resultados fueron:

Cuadro 1. Análisis de caracterización de los suelos de invernadero y campo

	Fluvisol salino	Entisol
Procedencia	Revuelta perdida	Bajo cural
Textura	Franco arenoso	Arena franca
C.E. (dS m ⁻¹)	5.27	3.17
pH	7.7	6.1
CaCO ₃ (%)	0	0
M.O (%)	0.88	1.18
P (ppm)	9.4	76
K ₂ O (kg ha ⁻¹)	1197	1725
S - SO ₂ (ppm)	58.4	50.2

El análisis de agua nos indica que su contenido de sales es medio-alto (C3) y que podría ocasionar problemas en el cultivo dependiendo del tipo de sales, del suelo y sensibilidad del cultivo ante las sales, la concentración de sales es de 665 ppm siendo el contenido de sulfatos de 170 ppm. En cuanto al rango de adsorción de sodio (SAR) no hubo problemas ya que se encuentra dentro del límite bajo (S1).

Características de los cultivos.- Se empleó la cebolla roja americana y papa cultivar 'revolución' como cultivos indicadores de los tratamientos.

Fertilizantes empleados.- Los fertilizantes empleados fueron simples y se comparó aquellos más concentrados con otros que contenían azufre en su composición además del macroelemento primario (ver cuadro 2).

Cuadro 2. Fertilizantes empleados

Fertilizante	% N	%P ₂ O ₂	%K ₂ O
U	45-46	0	0
S.A	20-21	0	0
S.T	0	46	0
SF-24	0	22-24	0
CIK	0	0	60-62
S.K	0	0	48-52

U : Urea CO(NH₂)₂;

SA: Sulfato de amonio (NH₄)₂SO₄ (95 a 98%)

ST: Superfosfato triple de calcio Ca(H₂PO₄)₂ (95%);

SF-24: Superfos 24 Ca(H₂PO₄)₂ + CaSO₄ 2H₂O + Ca(PO₄)₃

CLK: Cloruro de potasio CLK (95 - 98%)

SK: Sulfato de potasio K₂SO₄ (95-98%)

Metodología

Delimitación del campo experimental.- Considerando las características del suelo se delimitó el campo experimental teniendo, en cuenta el número de tratamientos. Cada tratamiento tuvo 3 parcelas o repeticiones y cada parcela tuvo 4 surcos distanciados entre sí 1m y con una longitud de 6m lo que determina un área de 24 m². El área experimental teniendo en cuenta el distanciamiento entre bloques y bordes fue aproximadamente de 900 m² para cada experimento. Para la delimitación se usó una wincha, cordel, estacas y yeso y en todo momento se trató de mantener uniformidad en las parcelas.

Siembra y abonamiento. La siembra del cultivo de cebolla fue el 12 de junio de 1997 y la del cultivo de papa el 21 de julio de 1997. El día de la siembra se realizó el abonamiento de 1/2N, P y K según los tratamientos, el resto de N se aplicó en el momento del aporque. En el caso de la cebolla la dosis de abonamiento fue de 240-200-160 y 10t de estiércol a la siembra, mientras que el de la papa fue 240-240-120; ello debido a que en todo momento se siguió la metodología de trabajo del agricultor.

Cosecha.- Se efectuó en el cultivo de cebolla el 12 de noviembre de 1997 y en el cultivo de papa fue el 27 de diciembre de 1997. Se cosecharon las plantas de los dos surcos centrales de cada parcela de 4 surcos para evitar el efecto de borde entre los tratamientos, luego se pesó en una balanza para obtener el rendimiento total extrapolando a una hectárea.

Factores en estudio

Factor N: Urea (45-46% N) y sulfato de amonio (21% N, 24% S)

Factor P: Superfosfato triple de calcio (46% P_2O_5) y superfos-24 (24% P_2O_5 , 8% S)

Factor K: Cloruro de potasio (60% de K_2O) y sulfato de potasio (50 % de K_2O , 21% S)

Los tratamientos fueron:

Cuadro 3. Tratamientos de experimentos

Tratamiento	N	P_2O_5	K_2O
1	U	ST	CIK
2	U	ST	SK
3	U	SF-24	CIK
4	U	SF-24	SK
5	SA	ST	CIK
6	SA	ST	SK
7	SA	SF-24	CIK
8	SA	SF-24	SK
9	0	0	0
10	0	ST	SK
11	U	0	SK
12	SA	ST	0

Diseño estadístico.- Se utilizó el diseño completamente al azar con arreglo factorial de 2 x 2 x 2 (2 fuentes de nitrógeno, dos de fósforo y dos de potasio) con 3 repeticiones más 4 tratamientos adicionales. Con los datos de rendimiento ($t\ ha^{-1}$) se realizó el análisis de variancia (ANVA) y el análisis de los efectos de primero, segundo y tercer orden para mejor interpretación de los resultados. Se utilizó la prueba estadística de DLS (0.05) para determinar el nivel de significación entre los tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el caso de la cebolla aquellos tratamientos que tenían dos o las tres fuentes de fertilizantes concentrados presentaron los menores rendimientos (menos de 60 t) mientras que los tratamientos donde se fertilizó con dos fuentes de azufre en forma indirecta se obtuvieron los mayores rendimientos (más de 60 t) siendo el tratamiento SA-SF-24-SK el que dió el mayor rendimiento con más de 69 t.

En el caso de la papa aquellos tratamientos donde se abonó con fertilizantes concentrados (U, ST y CIK) y con SF-24 (baja solubilidad) tuvieron los menores rendimientos mientras que los tratamientos donde se utilizó SA y/o SK dieron los mayores rendimientos probablemente por el aporte de sulfatos por estos fertilizantes (ver cuadro 4).

En ambos cultivos se observó, que aquellos tratamientos donde se usaron fertilizantes con azufre en su composición presentaron una mejor calidad comercial probablemente por la mayor formación de proteínas lo cual les permitió resistir mejor el ataque de enfermedades fungosas.

Cuadro 4. Rendimiento total por bloques ($t \cdot ha^{-1}$) de cebolla americana y de papa en Arequipa durante la campaña de 1997

Nº	Tratamiento	Cebolla roja americana			Papa		
		I	II	III	I	II	III
1	U - ST - CIK	78.0	43.8	50.8	35.0	31.0	29.0
2	U - ST - SK	71.8	50.8	47.3	40.0	33.0	34.0
3	U - SF-24 - CIK	63.0	54.3	61.3	32.0	30.0	26.0
4	U - SF-24 - SK	71.8	77.0	57.8	29.0	33.0	31.0
5	SA - ST - CIK	63.0	56.0	56.0	32.0	33.0	33.0
6	SA - ST - SK	49.0	73.5	61.3	29.0	36.0	34.0
7	SA - SF-24 - CIK	57.8	66.5	66.5	28.0	27.0	37.0
8	SA - SF-24 - SK	64.8	73.5	70.0	27.0	33.0	39.0
9	0 - 0 - 0	33.3	36.8	42.0	13.0	18.0	19.0
10	0 - ST - SK	40.3	49.0	40.3	20.0	22.0	16.0
11	U - 0 - SK	48.0	47.3	47.3	21.0	25.0	25.0
12	SA - ST - 0	54.3	49.0	50.8	28.0	24.0	27.0

CONCLUSIONES

1. En el rendimiento de papa y cebolla estadísticamente no hubo diferencias significativas en usar fertilizantes concentrados con aquellos que contienen azufre lo cual demuestra que estos suelos asociados a los cultivos mencionados, clima y manejo, están bien provistos del elemento azufre.
2. Se observó la tendencia hacia un mejor rendimiento y calidad de los cultivos al usar fertilizantes con azufre.
3. A pesar de que no hubo diferencias significativas entre el uso de fertilizantes sin y con azufre, el uso de fertilizantes con azufre compensan los costos e incluso generan ganancias por incrementar el rendimiento y mejorar la calidad de los cultivos.
4. En cebolla los mayores rendimientos en función del uso de fertilizantes que contienen azufre se lograron con SF-24 > SK > SA.
5. En papa los mayores rendimientos en función del uso de fertilizantes que contienen azufre se lograron con SK > SA > SF-24.
6. El cultivo de cebolla roja por ser más extractivo en azufre, requirió de la aplicación indirecta de por lo menos dos fuentes de fertilizantes que lo contenían mientras que el cultivo de papa por ser poco extractivo en azufre requirió sólo de la aplicación de una fuente.

BIBLIOGRAFÍA

1. BEATON, J.D. (1966). Sulfur requirements of cereals, tree fruits, vegetables and other crops. *Soil Science* 101: 267-282.
2. BLAIR, G.J. (1979). Sulfur in the tropics. IFDC Technical Bulletin T-12, 69pp.
3. BORNEMISZA, E. (1990). Problemas del azufre en los suelos y cultivos de mesoamérica. Ed Univ. Costa Rica. Editorial de la Universidad de Costa Rica. 104 pp.
4. BORNEMISZA, E. (1959). Categorías de azufre en la meseta central, San José, Costa Rica. Ministerio de Agricultura e Industrias. Informe 7 pp.
5. BROIMFIELD, A.R. (1973). *J. Agri. Sci and Expl. Agric.*, 9, 55.
6. BURBANO, H. y BLASCO, M. (1975). Suelos volcánicos de Nicaragua. II Contenidos y distribución de azufre. *Turrialba* 25 (4): 429-435.
7. CHAO, T.T; HARDWARD, M.E; FANG, SC. (1962). Movement of ³⁵ S tagged sulfate through soil columns. *Soil Science Soc.Am.Proc.* 26(1): 27-32.

8. COLEMAN, R (1966). The importance of sulphur as a plant nutrient in world crop production. *Soil Science* 101: 230-239.
9. FASSBENDER, H (1982). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Ed IICA. 398 pp.
10. FERTILIZANTES Y PLAGUICIDAS EN AMERICA LATINA (1999). Usos agrícolas del azufre en países de América Latina. Editado por British sulphur publishing Ltd. Año 4, No. 3, Septiembre. 48pp.
11. FOX, R.L.; ASGHAR, M.; CABLE, W.J. (1983). Sulfate accretion in soils of the tropics. In Blair, G.J. and Till, A.R., Eds. *Sulfur in S.E. Asian and S. Pacific Agriculture*. Armidale, Australia. University of New England. Pp 39-53. GROS, A. (1981). *Abonos. Guía práctica de la fertilización*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 7ma. Edición.
12. HAGSTROM, G.R. (1986). Fertilizer sources of sulfur and their uses. In: *sulfur in agriculture*, M.A. Tabatabai (ed). ASA Agronomy N° 27, Madison USA, 588 pp.
13. INDUS (s/a). Superfos-24; el abono fosfatado de gran poder residual. Fabricantes de abonos Compuestos Granulados y Superfosfatos.
14. JONES, M.B, et al (1968). *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 535.
15. KAMPRATH, E.J.; TILL, A.R (1983). Sulfur cycling in the tropics. In Blair, G.J and Till, A.R., Eds *Sulfur in S.E. Asian and S. Pacific Agriculture*. Armidale, Australia, Univ. of New England. 324 pp.
16. KANWAR, J.S Y MUDABAR, M.S. (1986). *Fertilizer sulfur and food production* M. Nijhoff/ Dr. w. Junk Publ. Dordrecht, Holland, 247 pp.
17. LI, P. y CALDWELL, A.C. (1966). The oxidation of elemental sulfur in soil. *Soil Science Society of America Proceeding*. 30: 370-372.
18. MALAVOLTA, E. (1976). *Manual de química agrícola. Nutrición de plantas y fertilidad del suelo*. Editora Agronómica Ceres Ltda. Sao Paulo, Brasil.
19. MENGEL K. and KIRKBY E. (1982). *Principles of plant nutrition*. Publisher International Potash Institute. 623 pp.
20. NAVARRO, A.A. y PADDA, D.S. (1983). Effects of sulfur, phosphorus and nitrogen application on the growth and yield of sweet potatoes grown on Fredensborg clay loam. *Journal of agriculture of the University of Puerto Rico*. 67: 108-111.
21. NOR, Y.M. y TABATABAL, M.A. (1977). Oxidation of elemental sulfur in soils. *Soil Science Society of America, Journal* 41: 736-741.

22. PEARSON, R.W.; ABRUÑA, F.; VICENTE-CHANDLER, J. (1962). Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. *Soil Science* 93: 77-82.
23. PROBERT, M.E.; SAMOSIR, S.S. (1983). Sulfur in non-flooded tropical soils. In Blair, G.J. and Till, A.R., Eds, *Sulfur in S.E. Asian and S. Pacific Agriculture*. Armidale, Australia, Univ. of New England 1983. pp. 15-27.
24. QUEVEDO F. (s/a) *Fertilidad del Suelo* 224 pp.
25. STARKEY, R.L.(1966). Oxidation and reduction of sulfur compounds in soils. *Soil Science*. 101: 297-306.
26. STEINHARDT, U; FASSBENDER, H.W. (1979), *Características y composición química de las lluvias de los Andes Occidentales de Venezuela*. Turrialba 29: 175-182.
27. THE SULPHUR INSTITUTE. (s/a). 1725 K Street. N.W. Washington D.C. 20006 U.S.A
28. TISDALE, S Y NELSON, W. (1977). *Fertilidad de los suelos y fertilizantes*. Editorial Montaner y Simon S.A. Barcelona, España. URBANO y ROJO (1992). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Rusell*. Ediciones Mundi-Prensa. 1045 pp.
29. VILLAGARCIA S.; AGUIRRE G. (1994). *Manual de uso de fertilizantes*. UNALM, Departamento de Suelos y Fertilizantes. 142 pp.
30. VILLAGARCLA, S.; AGUIRRE, G.; LOLI, O.; y TOMASSINI, L (1990). *Resultados de ensayos de campo sobre fertilización y nutrición mineral en el cultivo de papa (campaña 1989-1990)*. UNALM, Departamento de Suelos y Fertilizantes. Lima-Perú.
31. VILLAGARCIA, S.; AGUIRRE, G.; LOLI, O.; PALOMINO, R; TELLO, L. y TOMASSINI, L (1997). *Fertilidad, manejo de suelos y nutrición mineral del azufre bajo diversas condiciones de clima, suelo, cultivos y nivel tecnológico de la agricultura andina. Cuadros resumen de los resultados experimentales de campo, invernadero y laboratorio durante la campaña 1996/1997*. 152 pp.