

MANUAL DE AZUFRE EN SUELOS Y PLANTAS

Angélica Sadzawka R.
Centro Regional de Investigación La Platina, Instituto de Investigaciones
Agropecuarias INIA
E-mail: asadzawk@platina.inia.cl

INTRODUCCIÓN

El azufre, a pesar de ser un elemento esencial para las plantas, ha recibido relativamente poca importancia como nutriente, debido en parte al hecho que la respuesta de los cultivos a la aplicación de azufre se restringía a unas pocas áreas geográficas y solamente a algunos cultivos. Sin embargo, actualmente se ha detectado deficiencia de azufre cada vez con más frecuencia y en una amplia variedad de cultivos, un resultado que se ha atribuido al aumento en el uso de fertilizantes libres de S, a la pérdida de materia orgánica de los suelos, a la reducción en el uso de S como pesticida y al aumento de los rendimientos, lo cual significa que los requerimientos de todos los nutrientes esenciales son mayores. Otro factor que contribuye es la reducción en las cantidades de S que llegan al suelo por la lluvia o por depósitos de polvo. Cuando se adopten sistemas efectivos de control de las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) de la industria, probablemente aumentarán aún más las áreas deficientes en S.

PROPIEDADES QUÍMICAS DEL AZUFRE

El azufre existe en varias valencias o estados de oxidación, desde -2 en los sulfuros (sulfuro ferroso, FeS) hasta +6 en los sulfatos (SO_4^{-2}). Las reacciones de oxidación y reducción ocurren más bien fácilmente cuando las condiciones son adecuadas, lo que explica la gran diversidad de reacciones que sufre el S en la naturaleza (Cuadro 1).

Cuadro 1. Especies inorgánicas de S en la naturaleza.

Sulfuro, -2		Tiosulfato*, -2 y +6	
ion sulfuro	S^{-2}	ion tiosulfato	$S_2O_3^{-2}$
ion hidrógenosulfuro	HS^{-}	ion hidrógenotiosulfato	$HS_2O_3^{-}$
ácido sulfídrico	H_2S	ácido tiosulfúrico	$H_2S_2O_3$
Polisulfuro, -1		Sulfito, +4	
ion disulfuro	S_2^{-2}	ion sulfito	SO_3^{-2}
pirita	FeS_2	ion hidrógenosulfito	HSO_3^{-}
		dióxido de azufre	SO_2
Elemental, 0		Sulfato, +6	
azufre	S°	ion sulfato	SO_4^{-2}
		ion hidrógenosulfato	HSO_4^{-}
		ácido sulfúrico	H_2SO_4

* El S a menudo se encuentra en más de un estado de oxidación en la misma especie. Así por ejemplo el tiosulfato tiene un S a -2 y uno a +6, con un valor promedio de +2.

EL AZUFRE EN LOS SUELOS

La principal fuente original de S en los suelos es la pirita (FeS_2) de las rocas ígneas. Durante la meteorización, el S de la pirita se oxida a la forma de sulfato (SO_4^{-2}), el cual finalmente es asimilado por las plantas y los microorganismos e incorporado a la materia orgánica del suelo. En algunos suelos, parte del S se retiene como yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y epsomita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) o se lixivias. En las regiones secas, donde la pluviosidad es insuficiente para lixiviar el SO_4^{-2} del perfil de suelo, a menudo se acumula yeso en un horizonte bajo una zona de acumulación de carbonato de calcio.

El contenido total de S de los suelos varía en un amplio rango, desde menos de 20 mg/kg (0,002 %) en suelos altamente meteorizados y lixiviados de regiones húmedas (especialmente si son arenosos) hasta sobre 50.000 mg/kg (5 %) en suelos calcáreos y salinos de regiones áridas y semiáridas.

El rango normal de S en los suelos agrícolas de regiones húmedas y semihúmedas es de 100 a 500 mg/kg o de 0,01 a 0,05 %. Estas cantidades equivalen a alrededor de 200 a 1000 kg/ha en la capa arable, sin embargo, la mayoría del S está en formas orgánicas que no son disponibles directamente para las plantas. Los cultivos intensivos por largo tiempo y sin la adición de fertilizantes ha disminuido la cantidad total de S presente en el suelo, debido principalmente a la mineralización de la materia orgánica.

El S es agregado al suelo en los fertilizantes y enmiendas, en los pesticidas de varios tipos, en las aguas de riego y a través de la atmósfera. Esta última forma de adición se debe a que la actividad volcánica y la industria emiten anhídrido sulfuroso (SO_2) y otros compuestos de S a la atmósfera, y a que varios procesos biológicos naturales emiten compuestos de S, principalmente H_2S y dimetil sulfuro. Posteriormente, por

deposición, por arrastre con la lluvia o por absorción directa de gases, estos compuestos azufrados son incorporados al suelo, en cantidades que varían con la localidad y época del año. Como el S atmosférico proviene principalmente de la combustión de carbón y otros combustibles fósiles, las mayores cantidades de S (hasta 200 kg/ha.año) se depositan cerca de las áreas industriales mayoritariamente durante los meses de invierno. En las regiones rurales alejadas de sitios industriales menos de 5 kg/ha.año de S regresan al suelo por esta vía.

Las pérdidas de S de los suelos agrícolas ocurre principalmente por lixiviación. La magnitud de la pérdida de SO_4^{2-} depende de la pluviosidad, de la capacidad de retención de SO_4^{2-} del suelo, de las características del drenaje y de la inmovilización por microorganismos durante la descomposición de los residuos vegetales. En suelos de textura gruesa bajo una alta pluviosidad, se pueden esperar las mayores pérdidas de S. Debido a la lixiviación, el SO_4^{2-} no se acumula en suelos de regiones húmedas y semihúmedas.

Además de la lixiviación, el S se puede perder a través de la producción de H_2S y compuestos orgánicos volátiles por microorganismos, pero este mecanismo solamente es importante en suelos sumergidos.

Química del azufre del suelo

El S se encuentra en el suelo en formas orgánicas e inorgánicas. La cantidad de S en las dos formas varía ampliamente, dependiendo de la profundidad y de las características del suelo. pH, drenaje, contenido de materia orgánica, composición mineralógica.

A diferencia del fosfato, el sulfato se lixivía fácilmente. Así, en suelos altamente lixiviados, las formas inorgánicas de S se han eliminado y solamente permanecen las formas orgánicas. El Cuadro 2 resume los resultados de 37 suelos superficiales (0-15 cm) de Iowa, EEUU, donde se observa que el 95-99% del S está en forma orgánica.

Cuadro 2. S orgánico e inorgánico en 37 suelos superficiales de Iowa. (adaptado de Stevenson, 1986)

Forma de S	Rango Promedio		Rango Promedio	
	mg/kg		% del S total	
Total	55-618	292		100
Orgánico	55-604	283	95-99	97
Inorgánico	1-26	8	1-5	3
sulfato	1-26	8	1-5	3
no sulfato	0	0	0	0

Formas inorgánicas de azufre

El S inorgánico del suelo se encuentra principalmente como sulfato, SO_4^{-2} , aunque pueden encontrarse compuestos de menor estado de oxidación, tales como sulfuros, sulfitos, tiosulfatos y S elemental. Bajo condiciones inundadas, el S inorgánico se encuentra en formas reducidas, tales como ácido sulfídrico (H_2S), sulfuro ferroso (FeS) y pirita (FeS_2). En los suelos calcáreos y salinos una fracción importante del S inorgánico se encuentra como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Algunos suelos tienen la capacidad de retener S en forma adsorbida, pero esta sorción está restringida a los suelos ácidos y se debe principalmente a una reacción de intercambio aniónico por las cargas positivas de óxidos de Fe y Al y de arcillas. La materia orgánica ejerce un efecto negativo sobre la adsorción de SO_4^{-2} , lo cual explica la baja capacidad de adsorción de los suelos superficiales.

Formas orgánicas de azufre

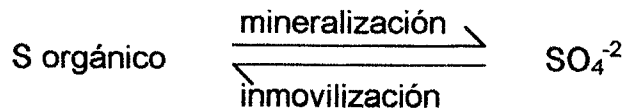
Como ya se ha mencionado, prácticamente todo el S presente en los suelos de regiones húmedas y semihúmedas está en forma orgánica. Por lo tanto, las cantidades absolutas de S total y orgánico dependerán de los factores que afectan el contenido de materia orgánica del suelo. La relación C/N/S promedio en suelos de diferentes regiones del mundo es notablemente similar y es de 140:10:1,3.

El S orgánico del suelo se divide en dos grandes grupos denominados: S unido al C y sulfato ésteres ($\text{R-O-SO}_3\text{H}$). Alrededor del 50% del S total de los suelos de regiones áridas y semiáridas se encuentra en formas unidas al C, de las cuales sólo una fracción está como aminoácidos. Otro 40% del S total se encuentra como sulfato ésteres de fórmulas desconocidas

Mineralización del azufre orgánico

La conversión del S orgánico a formas disponibles para las plantas se realiza por procesos microbiológicos. Cuando el suelo está bien aireado, el S orgánico se oxida a SO_4^{-2} que es la forma en que las plantas absorben el S. Simultáneamente, el SO_4^{-2} es asimilado por los microorganismos e incorporado en la biomasa en un proceso denominado *inmovilización*. El aumento en el contenido de S orgánico del suelo ocurrirá solamente cuando las condiciones sean adecuadas para la acumulación de materia orgánica, tal como adiciones frecuentes de residuos orgánicos.

Los procesos de mineralización e inmovilización ocurren simultáneamente y la cantidad de SO_4^{-2} disponible para las plantas en un momento dado representa la diferencia entre la magnitud de los dos procesos opuestos:



La velocidad relativa a la cual ocurren los dos procesos está influenciada por aquellos factores que afectan la actividad de los microorganismos, incluyendo la adición de residuos. Los aspectos más importantes relacionados con el S orgánico pueden resumirse en:

1. La cantidad de S mineralizado en suelos sin enmiendas no parece estar relacionado directamente con el tipo de suelo, la cantidad total de C, N o S; la relación C/S, N/S o C/N; el pH del suelo o el N mineralizable.
2. La mineralización de S sigue ciertos patrones como:
 - a) la inmovilización inicial es seguida por una mineralización neta en etapas posteriores
 - b) en el equilibrio, la liberación de SO_4^{-2} es lineal en el tiempo
 - c) a la liberación rápida inicial le sigue una liberación lineal más lenta
 - d) la velocidad de liberación disminuye con el tiempo.
3. La mineralización de S en la presencia de plantas es mayor que en barbecho, lo cual puede deberse a la mayor proliferación de microorganismos bajo plantas.
4. La mineralización de S es afectada por aquellos factores que influyen el crecimiento de microorganismos, tales como temperatura, humedad, pH y disponibilidad de alimento.
 - a) Temperatura. La mineralización se suprime a 10°C , aumenta cuando la temperatura sube de 20°C a 40°C y disminuye a temperaturas superiores.
 - b) Humedad. La mineralización se retarda considerablemente a niveles de humedad bajos (<15 %) y altos (>80 %). El contenido de humedad óptimo para la mineralización es del 60 % de la máxima capacidad de retención de agua.
 - c) pH. La mineralización generalmente es directamente proporcional al pH hasta un valor de aproximadamente 7,5.
5. La liberación de SO_4^{-2} es mayor cuando el suelo se seca y se rehúmedece antes de la incubación que cuando se incubaba sin secarlo previamente.

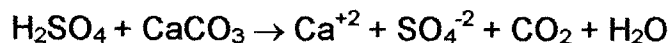
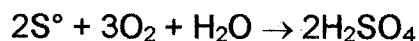
La adición de carbonato de calcio aumenta la cantidad de SO_4^{-2} soluble, probablemente debido a que se favorece el desarrollo de microorganismos que mineralizan S y a que se libera el SO_4^{-2} adsorbido por el aumento de pH.

Reacciones de óxido-reducción de compuestos inorgánicos de azufre

Los compuestos inorgánicos de S están sujetos a una variedad de reacciones de óxido-reducción que en su mayoría son realizadas por microorganismos. Desde el punto de vista de las condiciones agrícolas, el efecto más importante de estas transformaciones está enfocado hacia las formas de S completamente oxidado (SO_4^{-2}) y completamente reducido (H_2S).

La reducción del SO_4^{-2} por los microorganismos ocurre de dos maneras diferentes. En una el S es incorporado en los constituyentes orgánicos celulares, tales como aminoácidos, en un proceso denominado *inmovilización*. En la otra, un grupo especial de bacterias conduce a la formación de sulfuros, tal como H_2S , como producto final, en un proceso denominado *reducción respiratoria de SO_4^{-2}* que ocurre cuando el medio es favorable para el crecimiento de bacterias anaeróbicas.

Los compuestos inorgánicos reducidos de S (S^0 , H_2S , FeS_2 , etc.) son oxidados rápidamente en los suelos bajo condiciones adecuadas por un grupo de bacterias, principalmente del género *thiobacillus*, que utilizan la energía liberada para realizar sus propios procesos vitales. El S elemental (S^0) es oxidado a ácido sulfúrico por lo cual puede usarse para la recuperación de suelos sódicos calcáreos, ya que el ácido disuelve el carbonato de calcio liberando el Ca que se intercambia con el Na en el complejo de intercambio:



En los suelos neutros o ácidos el efecto acidificante puede ser perjudicial, por lo tanto, el uso de S^0 como una enmienda de suelo puede recomendarse sólo bajo ciertas condiciones. Se ha tratado de usar el poder de las bacterias oxidantes de S para la formación de fosfatos solubles a partir de la roca fosfórica, adicionando S^0 a la roca fosfórica. El H_2SO_4 formado reacciona con la roca fosfórica produciendo fosfatos mono y dicálcicos. Sin embargo, en la práctica, los resultados no han sido los esperados en la mayoría de los suelos.

Los aspectos principales relativos a la oxidación del S en los suelos pueden resumirse en:

1. La oxidación de las formas inorgánicas reducidas de S es principalmente un proceso biológico y ocurre mayoritariamente a través de bacterias del género *thiobacillus*.
2. Prácticamente todos los suelos contienen bacterias oxidantes de S, aunque su número en muchos suelos arables es bajo debido a la falta de S reducido para oxidar. Cuando se incorpora S al suelo se produce un rápido incremento de las

- bacterias oxidantes de S. Por este motivo, la inoculación artificial generalmente no se considera necesaria.
3. Los factores ambientales que favorecen el crecimiento de microorganismos del suelo también favorecen la actividad de los organismos oxidantes de S:
 - a) Temperatura. La oxidación del S ocurre entre 4°C y 55°C, pero el rango más favorable es 27-40°C.
 - b) Humedad y aireación. El contenido de humedad para la mayor velocidad de oxidación es alrededor de la capacidad de campo, aunque otros factores como la textura pueden afectar este nivel.
 - c) pH. La oxidación puede ocurrir entre pH 2 y 9, aunque generalmente aumenta al incrementarse el pH. El encalado de los suelos ácidos usualmente aumenta la velocidad de oxidación.
 - d) Población microbiana. La inoculación del suelo con organismos oxidantes de S usualmente aumenta la velocidad de oxidación. La adición de S° u otra forma reducida estimula la rápida multiplicación microbiana.
 4. La velocidad de oxidación del S° es afectada por varios factores, algunos de los cuales son:
 - a) Tamaño de partícula. La velocidad de oxidación del S elemental aumenta con la disminución del tamaño de partícula.
 - b) Localización. La mezcla del S° con el suelo generalmente produce una oxidación más rápida. Sin embargo, la localización en surcos o en cobertera puede ser muy efectiva bajo ciertas condiciones.
 - c) Dosis de aplicación. El aumento en la cantidad de S° aplicado a un suelo generalmente no afecta el porcentaje que se oxida en un período de tiempo dado. Hasta un cierto grado, la oxidación lenta de las partículas grandes de S° puede compensarse aumentando la dosis de aplicación.

Absorción de azufre

En los suelos de regiones húmedas y semihúmedas una gran proporción del S puede ser retenido como sulfato adsorbido. Los principales responsables son los óxidos hidratados de Al y Fe y los minerales de arcilla. Dentro de estos, los óxidos hidratados de Al adsorben más SO_4^{-2} que los de Fe y la caolinita más que la monmorillonita. En los suelos tropicales, la adsorción de SO_4^{-2} varía según la mineralogía dominante en el siguiente orden:

óxidos hidratados amorfos > óxidos cristalinos > caolinita > arcillas 2:1

La materia orgánica también puede adsorber SO_4^{-2} ; sin embargo, la adsorción se realiza a través de los óxidos hidratados de Fe y Al unidos al humus y no por la materia orgánica misma. Esto significa que la materia orgánica juega un doble papel en relación al S, por una parte, su mineralización libera S al medio y, por otra, inmoviliza parte del S liberado por adsorción y por incorporación en la biomasa.

La adsorción de SO_4^{-2} es fuertemente dependiente del pH. La cantidad adsorbida disminuye con el aumento del pH de 4 a 7 debido a la disminución de las cargas positivas de los coloides del suelo. Consecuentemente, cuando los suelos se encalan para aumentar el pH y precipitar el Al, liberan parte del SO_4^{-2} o retienen menos del SO_4^{-2} que se agrega. El sulfato así liberado puede ser usado por las plantas o lixiviado del suelo, dependiendo del régimen de pluviosidad.

La adsorción de fosfato es mucho mayor que la de sulfato en la mayoría de los suelos. Por lo tanto, la fertilización fosfatada, que produce un aumento de la carga negativa y una disminución de la carga positiva, tiene el mismo efecto sobre el SO_4^{-2} que el encalado. Estudios realizados en suelos volcánicos, indican que la fertilización fosfatada, a las dosis óptimas para los cultivos, produce pérdidas de SO_4^{-2} por lixiviación.

EL AZUFRE EN LAS PLANTAS

Las plantas contienen alrededor de la misma cantidad de S que de P, generalmente entre 0,2 a 0,5 % en base a la materia seca. Entre los compuestos que contienen S en las plantas están glutatiónina, tiamina, vitamina B, biotina, ferredoxina, coenzima A y los aminoácidos (cisteína, cistina y metionina), siendo estos últimos los que dan cuenta de más del 90 % del S de las plantas. Las formas inorgánicas de S se encuentran en pequeñas pero variables cantidades.

El S tiene numerosas funciones en la planta, muchas de las cuales están relacionadas con las transformaciones catalizadas por enzimas. La ferredoxina es el primer compuesto redox estable de la cadena fotosintética. El enlace disulfuro (-S-S-) sirve como unión entre las cadenas polipeptídicas en una molécula de proteína. El grupo sulfidral (-S-H) proporciona sitios para la unión de cationes metálicos y atar los grupos prostéticos a las enzimas. El grupo metilo de la metionina participa en la biosíntesis de lignina, pectina, clorofila y flavonoides.

Las plantas que sufren falta de S muestran síntomas de deficiencia característicos de la actividad fotosintética reducida. Se retarda el crecimiento y a menudo se detiene la madurez. En la mayoría de las plantas, las hojas jóvenes son de color verde claro, lo cual a veces se confunde con los síntomas similares de la deficiencia de N. Las deficiencias de S son comunes en las leguminosas, tanto las de grano como las de forraje.

La cantidad de S que requieren las plantas es muy variable (Cuadro 3). Las crucíferas (repollo) requieren considerablemente más S que la mayoría de los cultivos, debido a su tendencia a sintetizar altas cantidades de mercaptanos y glucósidos. Para los cultivos comunes, la cantidad total de S absorbido por la planta es de 10 a 40 kg/ha. Esto significa que en un suelo agrícola típico (100 a 500 mg/kg de S total) contendrá suficiente S en la capa arable para sólo unas pocas décadas de cultivo sin requerir

adiciones de S. Sin embargo, se debe considerar, por una parte, que el S se encuentra principalmente en forma orgánica no disponible directamente para las plantas y, por otra parte, que una fracción de S de las plantas se recicla cuando los residuos se incorporan al suelo después de la cosecha.

Cuadro 3. Contenido de S de algunos cultivos en la cosecha. Adaptado de Tabatabai (1986)

Cultivo	Rendimiento Mg/ha	Contenido de S kg/ha
Arroz, grano	8	6
Trigo, grano	4	9
Cebada, grano	6	12
Remolacha, raíz	70	12
Remolacha, aéreo		41
Maíz, grano	9	17
Maíz, forraje	70	36
Tomate	70	24
Nabo, raíz	43	39
Cebolla	70	44
Alfalfa	18	45
Gramíneas forrajeras	15	52
Repollo, cabeza	80	73

Las plantas absorben el S principalmente como sulfato (SO_4^{-2}) y la cantidad consumida depende de la concentración de sulfato en la rizósfera, la cual, a su vez, depende de la velocidad de reposición del sulfato por flujo de masas y difusión. En la mayoría de los suelos la reserva de SO_4^{-2} es inadecuada para el óptimo rendimiento y se desarrollarán deficiencias de S en un corto tiempo si no ocurren adiciones por la lluvia o a través de la descomposición de la materia orgánica.

ÍNDICES DE DISPONIBILIDAD DE AZUFRE

Las técnicas que se han usado para diagnosticar la deficiencia de S se han basado en el análisis de plantas y de suelos. En las plantas las más importantes son: S total, S- SO_4^{-2} , relación S- SO_4^{-2} /S total, relación N/S y el sistema DRIS.

En los suelos, la investigación se ha concentrado en desarrollar métodos capaces de extraer el S del suelo en proporción a su disponibilidad para las plantas. Sin embargo, los problemas son similares a los del N, en el sentido que los éxitos obtenidos han sido limitados y ningún procedimiento ha sido consistente superior a otro. Los resultados de los análisis de suelos son particularmente difíciles de interpretar en aquellos suelos donde prácticamente todo el S se encuentra en formas orgánicas.

Análisis de plantas

La concentración total de S en la planta entera o en una parte específica de la planta se ha usado ampliamente para diagnosticar el nivel de S de las plantas. El nivel deficiente de S total generalmente está alrededor de <1 g/kg pero puede variar entre <0,2 y <2 g/kg o aún más dependiendo de la etapa de crecimiento, la parte de la planta, la especie, etc. (Cuadro 4)

La concentración de S-SO₄⁻² o S reducible en las plantas también se ha usado con fines de diagnóstico. La base teórica de su uso es que las plantas absorben el S en forma de SO₄⁻², el cual se reduce a otras formas durante el metabolismo. Cuando el S es deficiente, la mayoría del S se incorpora en las proteínas y sólo una pequeña cantidad de SO₄⁻² puede ser detectada. Sin embargo, cuando el S está presente en exceso, el SO₄⁻² se acumula en las plantas. El coeficiente de variación es generalmente mayor para el S reducible que para el S total. La interpretación de los valores tiene el mismo problema que la del S total.

El uso de la relación S-SO₄⁻²/S total en las plantas tiene la ventaja que los valores críticos varían menos con la etapa de crecimiento, con lo cual la época de muestreo no es tan crítica. Tiene la desventaja que se necesitan dos determinaciones, lo que aumenta el error analítico. Las relaciones S-SO₄⁻²/S total críticas son de alrededor de 1:10.

La relación N/S también se ha usado para diagnosticar la nutrición azufrada, pero tiene la desventaja que no identifica cuál de los dos nutrientes es el limitante cuando la relación no es la adecuada. Sin embargo, para las leguminosas es un buen indicador del estado del S cuando las plantas están adecuadamente noduladas.

Cuadro 4. Niveles de S en algunas plantas. Adaptado de Westerman (1990).

Especie	Parte de la planta	Concentración de S (g/kg)	
		Rango normal	Deficiente
Alfalfa	completa	2,1-3,0	<2,0
Avena	completa	1,5-4,0	<1,5
Cebada	completa	1,5-5,5	<1,5
Cerezo	hoja	1,1-1,5	<0,7
Gramíneas forrajeras	aérea	1,4-1,8	<1,0
Maíz	completa	2,0-3,0	
Maíz	hoja	1,2-5,0	
Pasto bermuda	aérea	1,5-2,0	<1,0
Remolacha	lámina	0,5-14	<0,25
Sorgo	lámina		<1,5
Tréboles	aérea	1,2-1,9	
Trigo	completa	1,5-4,0	<1,5

El sistema DRIS consiste en comparar las relaciones de nutrientes en las hojas, o en otras partes de la planta, del cultivo en estudio con las relaciones óptimas de los mismos nutrientes en ese cultivo. Los elementos que son deficientes, adecuados o excesivos pueden entonces ser determinados. El sistema DRIS no se ha implementado en Chile.

Análisis de suelos

Los métodos para evaluar la disponibilidad de S en suelos se han concentrado en la estimación del SO_4^{-2} , que es la forma en que la plantas absorben el S. Los extractantes de S del suelo pueden clasificarse en aquellos que remueven en SO_4^{-2} fácilmente soluble (ej. agua, soluciones salinas neutras), aquellos que remueven el SO_4^{-2} soluble más una porción del SO_4^{-2} adsorbido (ej. solución de fosfato de calcio) y aquellos que remueven las dos porciones anteriores más una porción del S orgánico del suelo (ej. solución de fosfato con ácido acético, NaHCO_3).

La selección del extractante depende en algún grado de la naturaleza del suelo. Las soluciones de fosfato parecen ser mejores para los suelos ácidos que contienen variables cantidades de S orgánico y donde parte del SO_4^{-2} se encuentra adsorbido. El agua y las soluciones salinas neutras son preferibles para suelos de regiones semiáridas. En Chile, la Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo recomienda el uso de la solución de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol/L para la estimación de la disponibilidad de S en los suelos orientada a problemas de deficiencia de S.

Debido a la facilidad de lixiviación del SO_4^{-2} , en Nueva Zelanda se recomienda estimar la deficiencia de S en los suelos en base a dos parámetros: (1) una extracción con solución de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol/L del suelo muestreado a una profundidad de 0-75 mm, y (2) un índice de lixiviación que estima la susceptibilidad de pérdida de SO_4^{-2} por lixiviación.

El índice de lixiviación de SO_4^{-2} se determina usando tres parámetros (Cuadro 5):

1. La retención de SO_4^{-2} del suelo superficial, el cual está estrechamente relacionado y se determina con la retención de fosfato a la profundidad de 0-75 mm de suelo.
2. La suma anual del agua de lluvia y de riego que recibe el suelo.
3. El movimiento del agua en el suelo

Cuadro 5. Índices de lixiviación de sulfato usados en Nueva Zelanda. Adaptado de Jones (en Tabatabai, 1986)

Lluvia + Riego Mm/año	Movimiento del agua del suelo					
	Lento			Libre		
	Retención de fosfato (%)					
	Baja <60	Media 60-85	Alta >85	Baja <60	Media 60-85	Alta >85
<500	2	1	0	3	2	1
500-750	3	2	1	4	3	2
750-1500	4	3	2	5	4	3
>1500	5	4	3	6	5	4

Los índices de lixiviación de S se interpretan bajo las condiciones de Nueva Zelanda como se indica en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Interpretación de los índices de lixiviación de S en Nueva Zelanda. Adaptado de Jones (en Tabatabai, 1986)

Índice de lixiviación de sulfato	Lixiviación	
	Invierno	Verano
0, 1, 2	no hay	no hay
3	débil	no hay
4	severa	no hay
5	completa	débil
6	completa	severa

El índice de lixiviación de sulfato permite estimar las necesidades de análisis de suelos y la época de la toma de las muestras, especialmente cuando se ha fertilizado con S. En general, el muestreo debe hacerse después de 3 meses o más de la aplicación de S. En suelos con índices de 0 a 2, el muestreo puede hacerse una vez al año y en cualquier época del año. En los suelos con índices de 3 a 6, el muestreo en otoño permite estimar la disponibilidad de sulfato durante la temporada de cultivo, pero puede haber pérdidas importantes de S durante el invierno. En este caso, el análisis realizado a finales de invierno o principios de primavera proporcionará una mejor estimación del S disponible para la próxima temporada.

En Chile, la información sobre los niveles de S disponible no son muchos, especialmente en los suelos de la VI Región al norte. Algunos estudios han mostrado bajos niveles en los suelos del secano de la VI Región (Rodríguez, 1990; FONDECYT N°1950757). En los suelos bajo riego, el aporte de sulfato del agua de riego generalmente es suficiente para los cultivos. Estudios realizados en suelos de la Región

Metropolitana regados con aguas del Río Maipo muestran que el aporte en una temporada, con un riego de alrededor de 10 ML/ha, es de casi 1000 kg/ha de $S-SO_4^{-2}$ (Sadzawka y otros, 1992).

Interpretación de los análisis de suelos

Los intentos para calibrar los análisis de suelos no han tenido el éxito esperado debido a uno o más de los siguientes factores:

1. La velocidad de liberación de S de la materia orgánica es altamente variable y es afectada por los microorganismos del suelo.
2. La presencia de residuos orgánicos sin descomponer de bajo contenido de S puede disminuir el nivel de S debido a inmovilización.
3. El sulfato es móvil en el suelo y puede perderse fácilmente por lixiviación o hacerse no disponible por sorción.
4. La absorción de S por las plantas está influenciada por factores ambientales como temperatura y humedad. Además, la cantidad absorbida del subsuelo es altamente variable y depende de las características de las raíces.

Debido a los problemas planteados y a los escasos estudios realizados en los suelos de la VI Región al norte, tentativamente podría usarse como nivel crítico un valor de 10 mg/kg de $S-SO_4^{-2}$ extraíble con solución de $Ca(H_2PO_4)_2$ 0,01 mol/L.

RESUMEN

1. Las deficiencias de S, que tradicionalmente se limitaban a unas pocas áreas geográficas, se han incrementado debido al uso generalizado de fertilizantes libres de S, a la reducción en el uso de insecticidas y fungicidas que contienen S y al aumento en la productividad.
2. El rango normal de S total en los suelos agrícolas es de 100 a 500 mg/kg (0,01 a 0,05%), del cual sobre el 95% está en formas orgánicas, excepto en los suelos de regiones áridas donde puede acumularse yeso.
3. La cantidad de S que llega al suelo proveniente de la atmósfera varía con la localidad y la estación del año. En zonas cercanas a industrias, el aporte de S generalmente es importante en los meses de invierno. En zonas rurales, lejos de sitios industriales, el aporte de S no supera los 5-6 kg/ha.año.
4. El S inorgánico se encuentra principalmente como sulfato, SO_4^{-2} , que es la forma en que las plantas absorben el S.
5. El SO_4^{-2} es móvil en el suelo y puede perderse fácilmente por lixiviación, por inmovilización o por adsorción.
6. El S orgánico es un constituyente de los aminoácidos cisteína, cistina y metionina y es un componente integral de varias vitaminas y hormonas. Dos importantes reguladores del crecimiento de las plantas, tiamina y biotina, contienen S.
7. Simultáneamente ocurren en el suelo procesos de mineralización e inmovilización del S orgánico, gobernados por microorganismos.

8. La relación C:N:S de los suelos varía ampliamente dentro de una localidad determinada, pero el promedio para suelos de diferentes localidades es notablemente constante de alrededor de 140:10:1,3.
9. El S inorgánico sufre una variedad de reacciones de óxido-reducción realizadas por microorganismos.
10. Algunos suelos, especialmente aquellos que contienen caolinita y/u óxidos de Fe y Al, son capaces de retener SO_4^{-2} en forma adsorbida.
11. El contenido de S de las plantas es similar a la de P, generalmente entre 0,2 y 0,5% en base a la materia seca.
12. Los índices de disponibilidad de S han tenido un éxito limitado debido a que presentan problemas similares a los del N.
13. La Comisión de Normalización y Acreditación de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo recomienda usar una solución de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol/L para extraer el S disponible del suelo.
14. Se propone usar un nivel crítico de 10 mg/kg de S- SO_4^{-2} extraíble con solución de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol/L.

LITERATURA CITADA

RODRÍGUEZ S., J. 1990. La fertilización de los cultivos, un método racional. Depto. Ciencias Vegetales, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. 348-358.

SADZAWKA, A.; NOVOA, R. y LETELIER, E. 1992. Efecto de veintisiete años de fertilización en las características químicas de un suelo aluvial regado por el río Maipo. Agricultura Técnica 52(4):403-410.

STEVENSON, F.J. 1986. Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, USA, 380 p.

TABATABAI, M.A. (Ed.). 1986. Sulfur in agriculture. Agronomy N° 27. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 668 p.

WESTERMAN, R.L. (Ed.). 1990. Soil testing and plant analysis. 3th. Edition. Soil Science Society of America Book Series N° 3. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA. 784 p.