

Azufre en el Suelo

Nelson Walter Osorio

Ing. Agrónomo, M. Sc., Ph. D.

Universidad Nacional de Colombia

Profesor Asociado - Biotecnología Ambiental

Escuela de Biociencias- Facultad de Ciencias

Correo-e: nwosorio@unal.edu.co, nwosorio@gmail.com

Web-page: <https://sites.google.com/site/nwosorio/>

Temas a desarrollar

- Generalidades del S en la planta
 - Funciones del S en las plantas
 - Extracción de S por cultivos
 - Suelos deficientes en S
 - Síntomas visuales de deficiencia de S en las plantas
- Formas del S en el suelo
- Ciclo biogeoquímico de S en el suelo
 - S en minerales primarios y secundarios
 - S intercambiable
 - S soluble
- Determinación de S disponible en el suelo
- Interpretación del S disponible
- Factores que afectan la disponibilidad de S en el suelo
- Fertilizantes y fertilización con S

S en las plantas

- Las plantas toman S de la solución del suelo en forma de SO_4^{2-} (vía raíces) y $\text{SO}_2(\text{g})$ por las hojas.
- En las plantas el SO_4^{2-} es reducido
- En los tejidos vegetales esta en formas químicas : R-SH, R-S-S-R

Funciones en la planta

- Constituyente de aminoácidos esenciales (cisteína y metionina): 90%
- Constituyente de vitaminas (biotina, tiamina, coenzima A- ciclo Krebs)
- S en la Ferredoxina (proteínas de cloroplastos S-Fe) que permite la reducción de NO_2^- y de SO_4^{2-} y la asimilación de N_2 en el nódulo.
- Participa en procesos tales como la fotosíntesis, fijación de N_2 , síntesis de clorofila
- Hace parte de compuestos responsables por el aroma de algunos productos (mostaza, cebolla, café,...)

S en las plantas

- Absorción de S: las plantas cultivadas demandan cantidades moderadas de S, fluctúa entre 20-40 kg ha⁻¹
- Contenido adecuado en las hojas: 0.1-0.5%
- Crucíferas > Leguminosas > Gramíneas
- Semillas: 1.1-1.7% (Crucif.), 0.25-0.3% (Legum.), 0.18-0.19% (gramin.)

Efecto de la aplicación de sulfato sobre el contenido de clorofila en trébol rojo

Sulfato aplicado (mg kg ⁻¹)	Contenido de clorofila (%)
0	0.49
5	0.54
10	0.50
20	1.02
40	1.18

Suelos deficientes en SO_4^{2-}

- En América tropical 756 millones ha deficientes en SO_4^{2-} disponible (51% del área total).
- En Colombia regiones con deficiencia de SO_4^{2-} :
 - Orinoquia
 - Amazonia
 - Cordilleras andinas
- En Colombia regiones con suficiencia de SO_4^{2-} :
 - Valles interandinos
 - Región caribe

Síntomas de deficiencia de S

- Movilidad intermedia
- Síntomas aparecen en tercio medio de las plantas
- Clorosis generalizada de las hojas afectadas (verde pálido)
- La clorosis avanza rápidamente
- Retraso en el desarrollo de flores y maduración de frutos
- Reducción en la nodulación de leguminosas

Síntomas de deficiencia de Azufre



EL PROBLEMA: Lento crecimiento inicial, plantas de color verde claro—deficiencia de azufre (S).

Los síntomas de deficiencia de S en maíz son muy similares a deficiencia de N.

S: clorosis en hojas jóvenes parte superior de la planta. Apariencia atrofiada
Tallos cortos

N: clorosis en hojas maduras parte inferior de la planta



La deficiencia de S se presenta como una clorosis de los tejidos nuevos mientras que los tejidos viejos permanecen verdes.



La deficiencia de azufre se distingue de la de N, por cuanto las hojas viejas no muestran clorosis.





-S en maíz



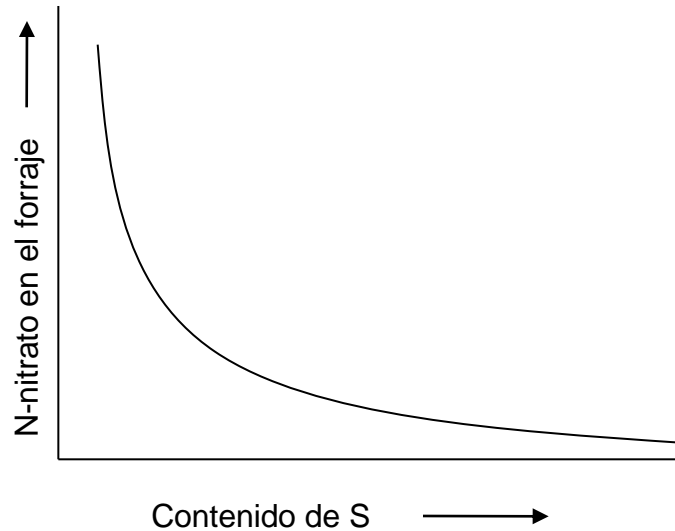
S deficiency in wheat. Chlorotic newer leaves are observed, as S is not translocated from older to newer leaves as readily as N.



S deficiency in soybean. Plant is stunted with light green and/or yellow newer leaves.

Deficiencia de S

- Falta de S permite la acumulación de N no proteínico (NH_4^+ , NO_3^-)
- Se recomienda que en el forraje la relación N/S este 9:1-12:1



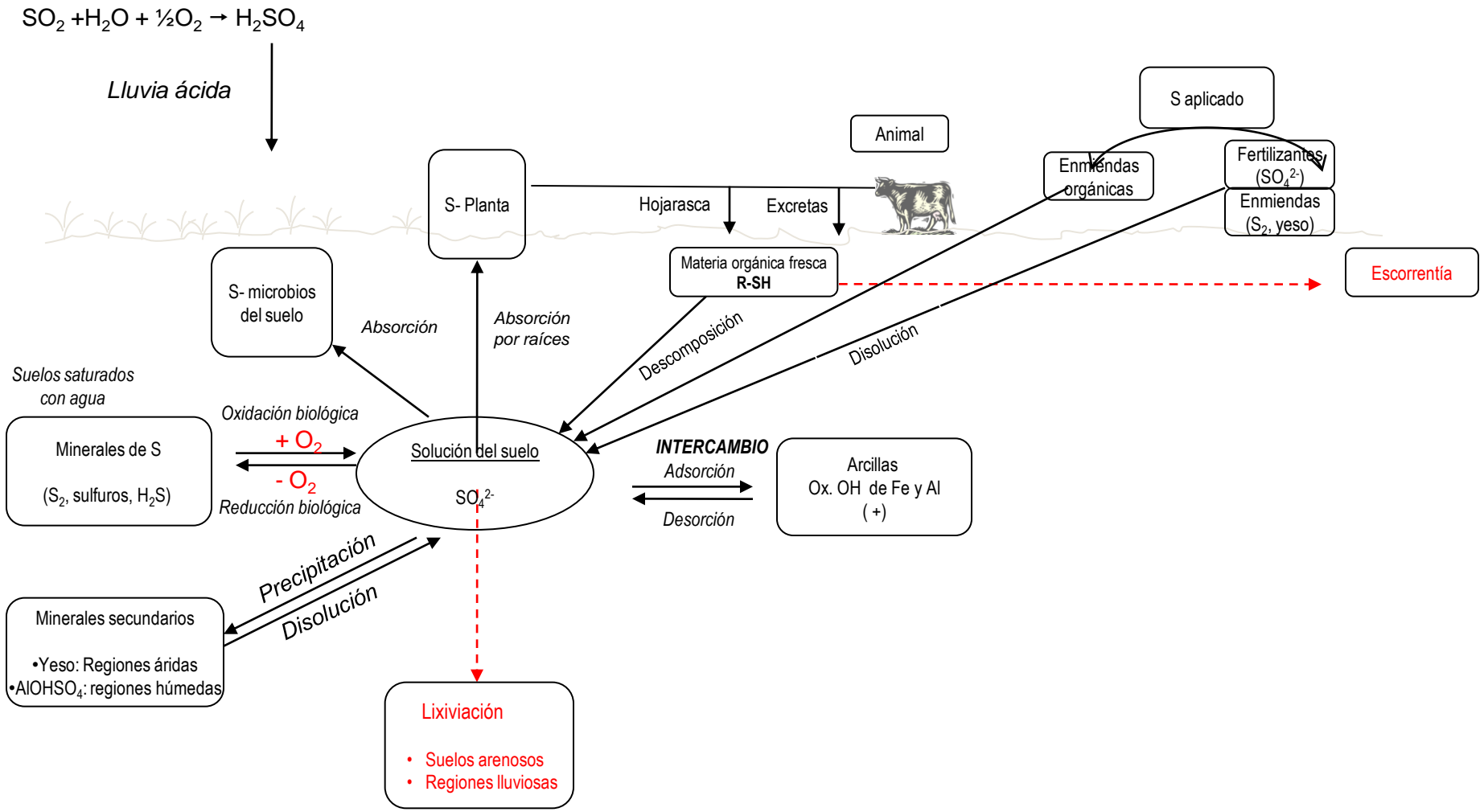
Deficiencia de S

- Suelos ácidos, alta lixiviación, alto Al.
- A pH alto (>6) no es normal encontrarla.
- Necesario aplicar como enmienda (S_2) cuando se desea acidificar el suelo o como nutriente (SO_4^{2-}).
- Sulfato solución $< 5 \text{ mg L}^{-1}$
- Sulfato intercambiable $< 100 \text{ mg kg}^{-1}$

Formas de S en el suelo

- **S total** = S orgánico + S inorgánico [S minerales (1° y 2°) + S intercambiable + S soluble
 - Usualmente S total fluctúa entre 0.02-0.2%
 - Suelos orgánicos: hasta 1%
 - Suelos volcánicos: hasta 2%
- **S-orgánico (~90%): R-SH, R-S-S-R, R-O-S-O**
- **S-inorgánico (~10%)**
 - S-mineral:
 - S elemental (S₂) importante en algunos suelos volcánicos
 - Azufre reducido: como sulfuro metálico (S⁻): [FeS₂, ...]: importante en suelos saturados por agua donde estas formas son estables, estas formas se oxidan para formar sulfato
 - Sulfato precipitado (CaSO₄, MgSO₄) en suelos de regiones áridas
 - Sulfato de Al
 - S-intercambiable (importante en suelos altamente meteorizados): ~100 mg kg⁻¹
SO₄²⁻ adsorbido por las cargas positivas en las superficie arcillas, óxidos.
(poco en humus R-NH₃⁺).
 - S- en solución:
SO₄²⁻ soluble inmediatamente disponible (N. América: 5-20 mg L⁻¹, América tropical: 3-5 mg L⁻¹)

CICLO DEL AZUFRE EN EL SUELO



Azufre orgánico

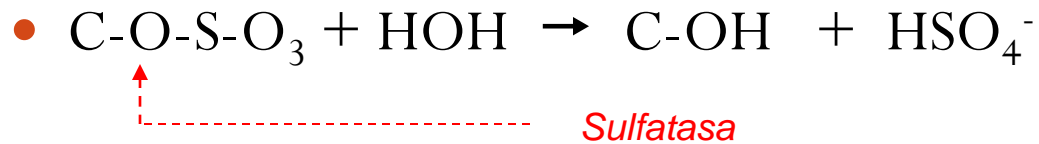
- S-orgánico:
 - S- reducible (R-O-S): aryl sulfatos, alkyl sulfatos, sulfato fenoles, polisacáridos sulfatados, lípidos sulfatados (27-59%; promedio 50%).
 - R-S-H: aminoácidos, proteínas (10-20%)
 - Otras formas de S orgánico: no identificadas (30-40%)

Mineralización del S de la materia orgánica

- Conversión oxidativa de S-orgánico a sulfatos
- Transformación realizada por microorganismos
- Relación N:S = 10:1
- Relación C:S < 200:1 (mineralización)
> 200: 1 (>400:1) (inmovilización)
- Materia orgánica fresca usualmente tiene C: S = 50:1
- Temperatura: 20-30°C
- pH 6-7

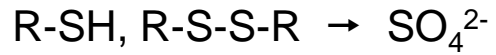
Actividad sulfatasa

- Enzima que remueve sulfato unido a la materia orgánica



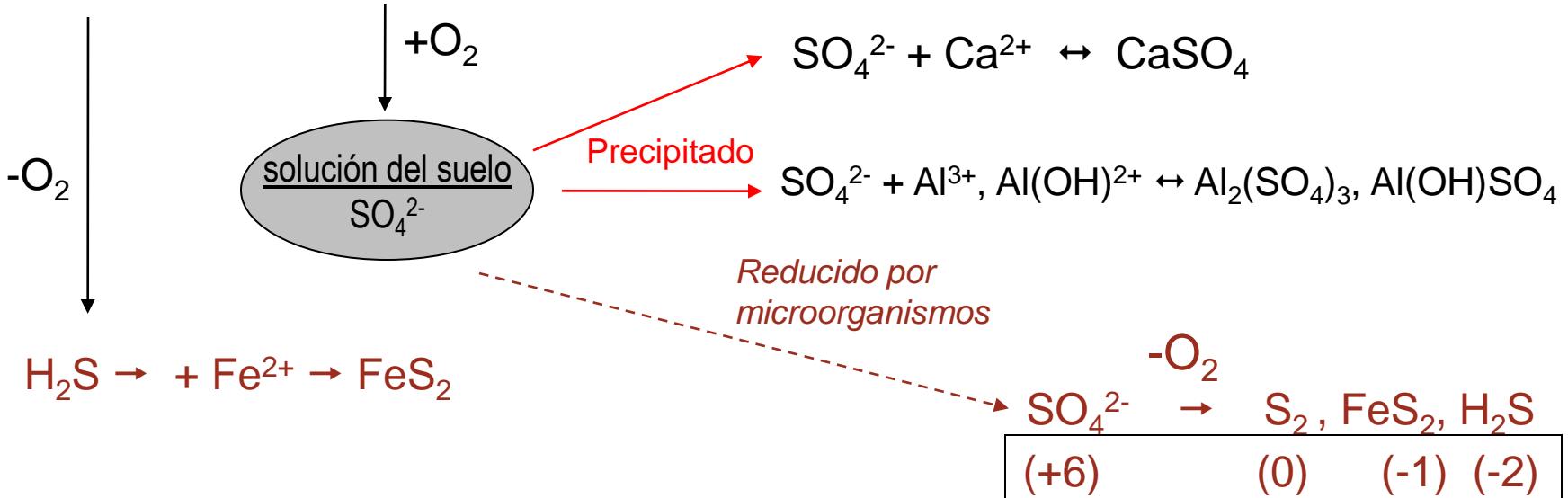
CICLO DEL AZUFRE EN EL SUELO

Materia orgánica



Precipitación de SO_4^{2-}

- con Ca (pH >6.5): regiones secas, áridas
- con Al (pH < 5.5): regiones lluviosas



Reducción microbial de SO_4^{2-} en ambientes anaeróbicos

- S_2, FeS_2 : se precipitan (insolubles-estables)
- H_2S : gas ácido sulfhídrico, olor "huevo podrido", pantanos

Sulfuros son inestables en suelos bien drenados

Oxidación microbiana de S₂ o sulfuros

Thiobacillus oxidans

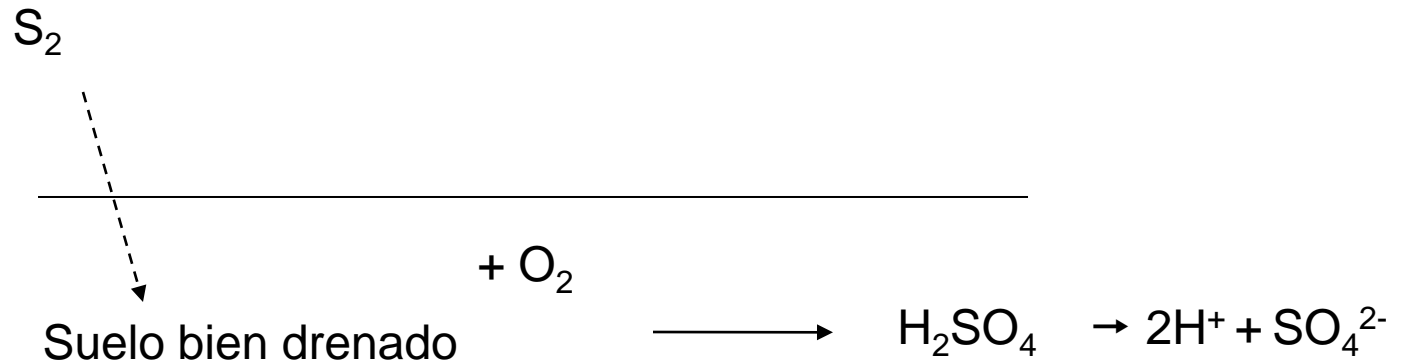


Thiobacillus ferrooxidans



Suelos sulfato-ácidos

Si se adiciona azufre elemental S_2^0 o sulfuro (S^-) a un suelo bien drenado se puede producir H_2SO_4



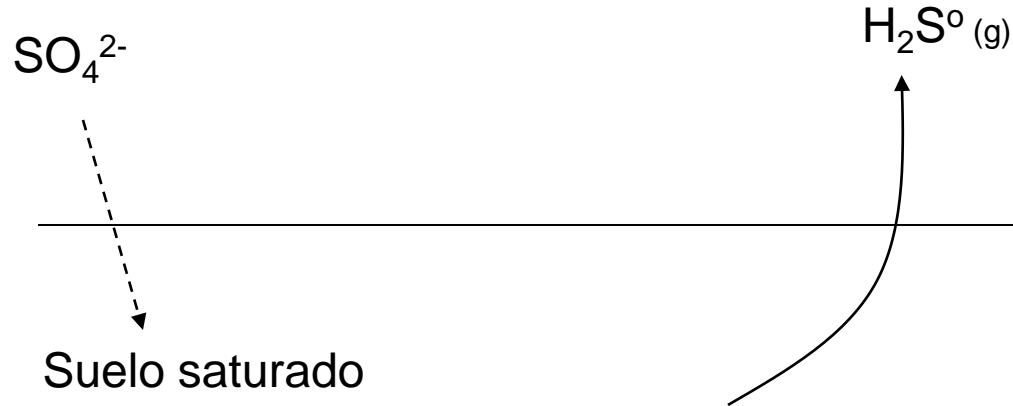
Bacterias autotrofas (*Thiobacillus oxidans*)

- Usan S_2^0 como fuente de energía y CO_2 como fuente de C
- Oxígeno es el aceptor final de eselectrones
- Se produce ácido sulfúrico (pH ~2)

Thiobacillus oxidans



Si se adiciona Sulfato a un suelo pobremente drenado se puede producir H_2S



Bacterias heterótrofas:

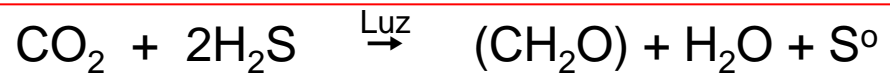
que usan materia orgánico como fuente de energía y C
y sulfato como aceptor final de electrones

Existen microorganismos FOTOLITOTROFOS
usan la luz como fuente de energía y CO₂ como fuente de C
(activos en ambientes acuáticos y sedimentos anaeróbicos (pantanos))

Luz

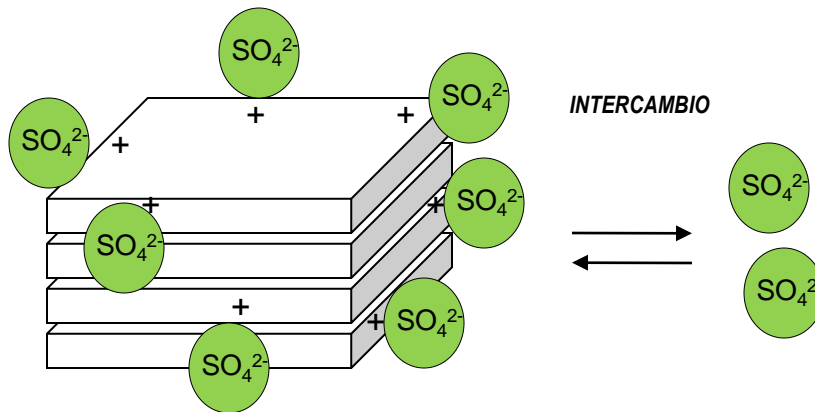
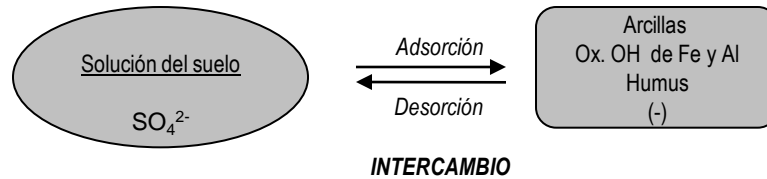


Bacterias fotosintéticas
(anaeróbicas)



Bacterias anaeróbicas obligadas (*Clorobium*, *Cromatium*)

- Usan luz fuente de energía y CO₂ como fuente de C
- H₂S como fuente de electrones y protones



Una pequeña proporción de los iones SO_4^{2-} está en la solución del suelo (S soluble).

- Suelos alta/. Meteorizados (trópico): $3\text{-}5 \text{ mg L}^{-1}$
- Suelos en zona templada: $5\text{-}20 \text{ mg L}^{-1}$

El SO_4^{2-} que esta en solución es el que toman las raíces u otros organismos (p.e., bacterias, hongos, etc.)

Representa una pequeña porción

Los iones de SO_4^{2-} pueden ser adsorbidos en sitios de la superficies de arcillas u óxidos donde hay cargas eléctricas positivas (SO_4^{2-} intercambiable), Importante en Caolinita y Oxidos de fe y Al en menor extensión en Arcillas 2:1 (illita, Montmorillonita)

A bajo pH (< 5.5) tiende a haber más SO_4^{2-} adsorbido

Serie liotrópica: $\text{H}_2\text{PO}_4^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- = \text{Cl}^-$

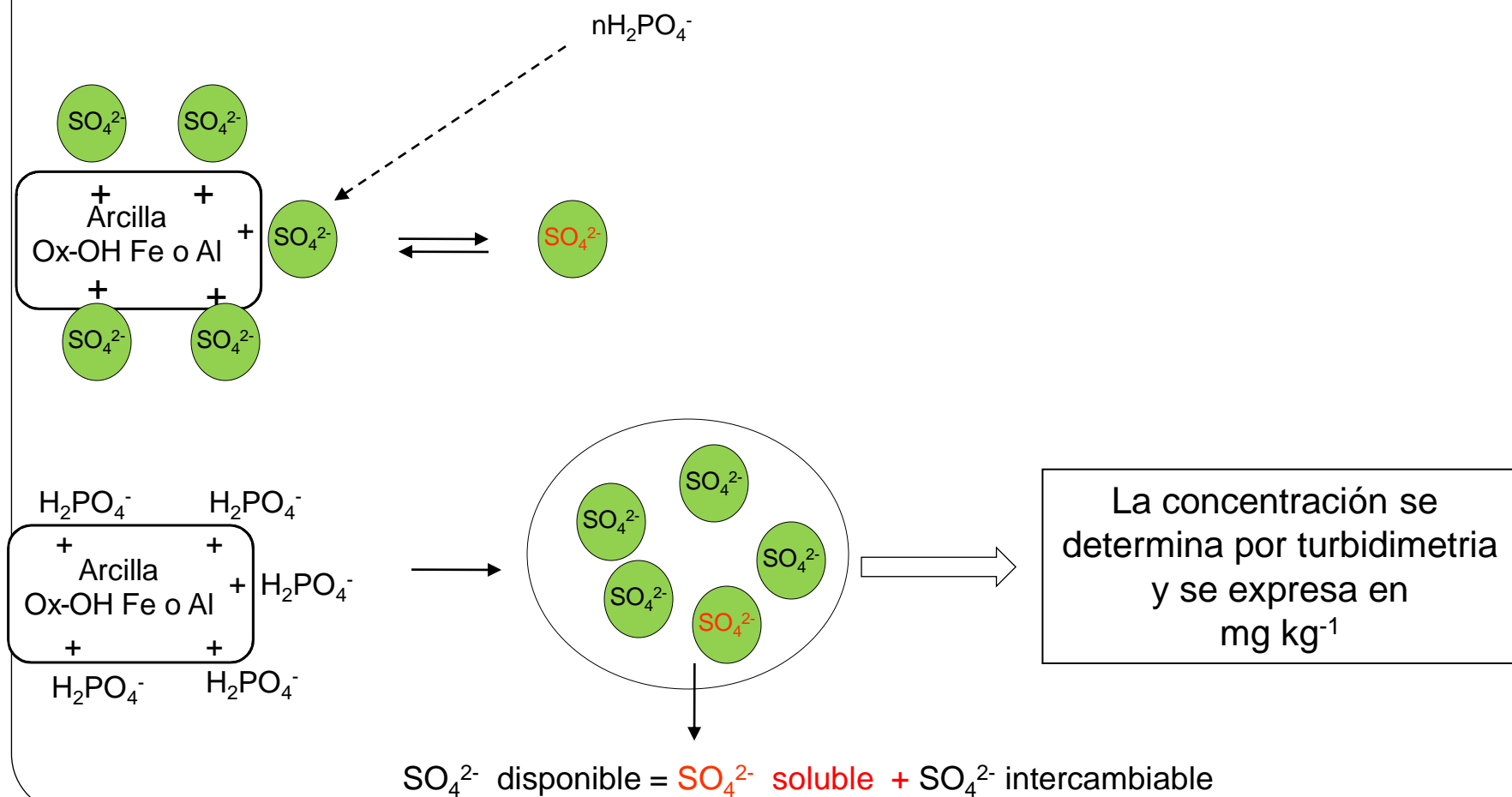
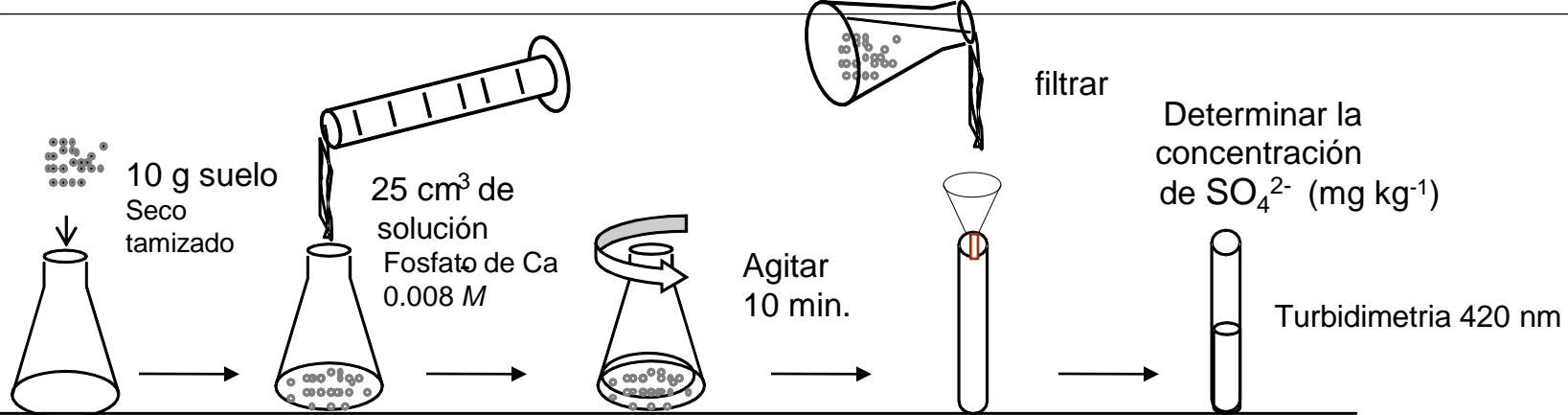
- Ambas formas de SO_4^{2-} están en equilibrio químico. Al aumentar una forma, aumenta la otra (y viceversa).

- El equilibrio es muy rápido (horas)

- La adsorción de SO_4^{2-} permite que en la fase sólida del suelo se retenga este nutriente en contra del proceso de lixiviación.

- Retenido allí se constituye en la reserva de éste nutriente en el suelo, que luego podrá ser tomado por las raíces.

Como se determina la disponibilidad de S en el suelo



Interpretación análisis de SO_4^{2-} extraído del suelo

- Lo extraído representa la suma de las fracciones soluble e intercambiable, que son las disponibles para ser absorbidos por las raíces.
- La interpretación se hace en función del cultivo (ver adelante)
- En general, se tiene la siguiente tabla:

S- SO_4^{2-} suelo ($\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$)	Categoría de interpretación*
<3	Muy baja
3-6	Baja
6-12	Media
12-15	Alta
>15	Muy alta

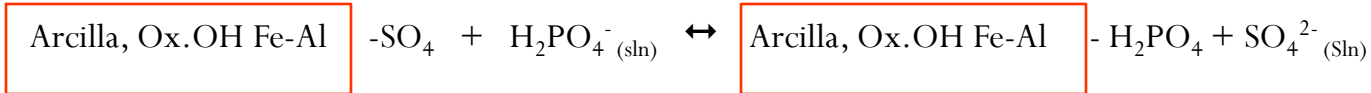
* Media: se considera una condición adecuada (no limitante para la producción vegetal).
Al aumentar la disponibilidad de SO_4^{2-} en el suelo se reduce los requerimientos de aplicar SO_4^{2-}

Factores que afectan la disponibilidad de S

- Nivel de SO_4^{2-} disponible en el suelo
- Disolución de minerales sulfato (yeso)
- Oxidación microbial de S_2 , sulfuros (XS_2)
- Contenido y descomposición de materia orgánica (N:S, C:S)
- Textura del suelo: suelos arenosos usualmente son deficientes SO_4^{2-} (lixiviación)
- pH del suelo: en suelos ácidos se espera bajo nivel de SO_4^{2-} , esto es debido a la precipitación con Al^{3+} ó $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$
- Potencial de oxido-reducción:
 - SO_4^{2-} en ambientes aeróbicos
 - S_2 , FeS_2 , H_2S en ambientes anaeróbicos

Factores que afectan la disponibilidad de sulfato

- Interacción con fosfato:




lixiviación

- Serie liotrópica: $\text{F}^- > \text{H}_2\text{PO}_4^-, \text{HPO}_4^{2-} > (\text{OH}^-) > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- = \text{Cl}^-$

S aplicado

Enmiendas

Fertilizantes

Fuentes de S

Enmienda	NOMBRE	PORTADOR NUTRICIONAL	S (%)	Solubilidad (g L ⁻¹) @ 20°C	Pureza
Flor de azufre	Azufre elemental	S ₂	100 (S)		90-95
Yeso	Sulfato de calcio	CaSO ₄ ·2H ₂ O	19(S),23(Ca)	2.55 g L ⁻¹	80-85%
Sulfato de magnesio	Sulfato de Mg	MgSO ₄ ·7H ₂ O	13(S),10(Mg)	33.7-260	98
SAM	Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	24(21 N)		98
Sulfato de potasio	Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	18(S), 50 (K ₂ O)	123.8	98

El contenido de S en enmiendas y fertilizantes se expresa en términos de S (%).

Enmiendas orgánicas (gallinaza, porcinoza, etc.) usualmente tienen 0.2-1.5% de S)

S aplicado

Enmiendas

Fertilizantes

Fuentes de S

Enmienda	NOMBRE	PORTADOR NUTRICIONAL	S (%)	Solubilidad (g L ⁻¹) @ 20°C	Pureza
Nitrasam	Nitrato y sulfato de amonio	NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	5 (30N)		90-95
Sulfomak	Sulfato de K y Mg	K_2SO_4 , MgSO_4	18-22, 22 (K ₂ O), 11(MgO)		95
Superfosfato simple	Fosfato de calcio y yeso	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	14(S), 20(P ₂ O ₅)		
Superfosfato triple	Fosfato de calcio y yeso	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.5(S), 44(P ₂ O ₅)		
Urea + S	Urea + S	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{S}$	10-20 (36-40 N)		
Sulfato de Zn	Sulfato de Zn	ZnSO_4	18, 36(Zn)		

El contenido de S en enmiendas y fertilizantes se expresa en términos de S (%).

Recomendación de fertilizantes S

depende de:

- Especie bajo cultivo (más cuidado en algunos como leguminosas y hortalizas, crucíferas,...)
- Nivel de S disponible en el suelo.
- Potencial de producción.
- Dada la baja solubilidad del S_2 y el requerimiento de oxidación microbial se aplica antes siembra (30 días antes de la siembra)
- Yeso se aplica a la siembra o un poco antes: recomendable si se quiere precipitar iones de Aluminio
- Sulfatos, son más solubles y se aplican en función del costo y de la necesidad de aplicar el nutriente acompañante (K, Ca, NH_4 , Mg)

Aplicación de S

- Como enmienda (para disminuir pH):
 - Incubación con S₂
 - Inocular con *Thiobacillus oxidans*
- Como nutriente (aporte de sulfato):
 - 20 - 60 kg S ha⁻¹ en función del nivel de S en el suelo

- Solubilidad de la fuente
- Nutriente acompañante

S suelo (mg kg ⁻¹)	S a aplicar (kg S ha ⁻¹)
<3	60
3-6	45
6-12	30
12-15	15
>15	0