

# Biodisponibilidad de elementos menores en el suelo y su manejo en los cultivos

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](mailto:nwosorio@unal.edu.co), [nwosorio@gmail.com](mailto:nwosorio@gmail.com)

WEB–PAGE: <https://sites.google.com/site/nwosorio/>



# Contenido

- ▶ Generalidades sobre los elementos menores (EM)
- ▶ Funciones de EM en las plantas
- ▶ Movilidad
- ▶ Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción
  - pH
  - Potencial redox
  - Disponibilidad de P en solución
  - Agentes quelatantes
  - Efecto de la materia orgánica humificada
  - ...
- ▶ Rangos adecuados de su biodisponibilidad para cultivos de flores
- ▶ Dinámica de EM en cultivos intensivos de flores. Estudio de caso
- ▶ Fertilización (dosis, fuentes, estrategias)
- ▶ Anexos: niveles foliares

# Elementos menores (EM)

- ▶ Cationes:  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$
- ▶ Aniones:  $\text{MoO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$
- ▶ Molécula:  $\text{H}_3\text{BO}_3^0$

# Elementos menores (EM) limitantes

- ▶ Cationes: **Fe<sup>2+</sup>**, **Mn<sup>2+</sup>**, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>
- ▶ Aniones: MoO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>
- ▶ Molécula: **H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub><sup>o</sup>**

## Elementos menores (EM)

Elemento	Forma química aprovechable	Rango de concentración en el tejido vegetal (mg kg <sup>-1</sup> )	Autor y año del descubrimiento de esencialidad
Fe	Fe <sup>2+</sup>	50-500	Von Sachs, Knop, 1860
Mn	Mn <sup>2+</sup>	50-300	McHargue, 1922
Cu	Cu <sup>2+</sup>	20-50	Sommer <i>et al.</i> , 1931
Zn	Zn <sup>2+</sup>	10-50	Sommer & Lipman, 1926
B	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	20-100	Sommer & Lipman, 1926
Cl	Cl <sup>-</sup>	100	Broyer <i>et al.</i> , 1954
Mo	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.1	Arnon & Stout, 1939
Ni	Ni <sup>2+</sup>	~0.1	De Brown <i>et al.</i> , 1987

## Elementos menores (EM)

Elemento	Forma química aprovechable	Rango de concentración en el tejido vegetal (mg kg <sup>-1</sup> )	Autor y año del descubrimiento de esencialidad
Fe	Fe <sup>2+</sup>	50-500	Von Sachs, Knop, 1860
Mn	Mn <sup>2+</sup>	50-300	McHargue, 1922
Cu	Cu <sup>2+</sup>	20-50	Sommer <i>et al.</i> , 1931
Zn	Zn <sup>2+</sup>	10-50	Sommer & Lipman, 1926
B	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	20-100	Sommer & Lipman, 1926
Cl	Cl <sup>-</sup>	100	Broyer <i>et al.</i> , 1954
Mo	MoO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.1	Arnon & Stout, 1939
Ni	Ni <sup>2+</sup>	~0.1	De Brown <i>et al.</i> , 1987

C	CO <sub>2</sub>	450 g kg <sup>-1</sup>	De Saussure, 1804
---	-----------------	------------------------	-------------------

N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	20-60 g kg <sup>-1</sup>	De Saussure, 1804
---	---	--------------------------	-------------------

# Funciones de los EM

Nutriente	Función(es) principal(es)
<b>Activadores de enzimas</b>	
Mn	Activador de enzimas, esencial en la fotólisis del agua
Zn	Cofactor de varias enzimas (dehidrogenasas, aldolasa, fosfatasas, DNA y RNA polimerasa)
Ni	Parte fundamental de la enzima ureasa

# Funciones de los EM

Nutriente	Función(es) principal(es)
<b>Agentes Redox</b>	
Fe	Componente de citocromos, peroxidasa y ferredoxina, en los cuales es responsable de reacciones redox
Cu	Componente de la citocromo oxidasa (respiración) y plastocianina (fotosíntesis), superoxido dismutasa (radicales $O_2^-$ ), fenol oxidasa (síntesis de lignina), y responsable de reacciones redox
Mo	Componente de la nitrato reductasa (reducción del $NO_3^-$ ) y de la nitrogenasa (reducción de $N_2$ en Rhizobios)

# Funciones de los EM

Nutriente	Función(es) principal(es)
<b>Otras funciones</b>	
B	Germinación del polen y crecimiento de tubo polínico, estabilidad de la estructura de la pared celular por formación de enlaces <i>cis-diol</i> con compuestos orgánicos (conductividad del agua a través de haces vasculares).
Cl	Osmosis, balance de cargas y fotólisis del agua

# Movilidad de los EM en las plantas

Nutriente	Movilidad relativa
Baja	Fe, Mn, Cu, Zn, (Ni ?), Mo
Alta	Cl
Intermedia ?	B

# Movilidad de los EM en las plantas

Nutriente	Movilidad relativa
Baja	Fe, Mn, Cu, Zn, (Ni ?), Mo
Alta	Cl
Intermedia ?	B

**B se considera de baja movilidad, pero bajo condiciones de alta evapotranspiración puede ser altamente móvil.**

- **Humedad relativa: baja**
- **Temperatura: alta**
- **Suelo: alta humedad y acidez**

# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## Elementos Menores catiónicos

pH

Potencial redox

Disponibilidad de P en solución

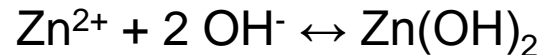
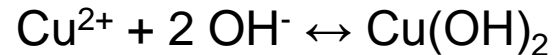
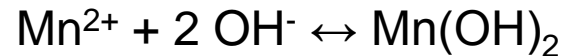
Efecto de la materia orgánica humificada

Agentes quelatantes

# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## ELEMENTOS MENORES CATIÓNICOS

pH (disponibilidad de H<sup>+</sup>)

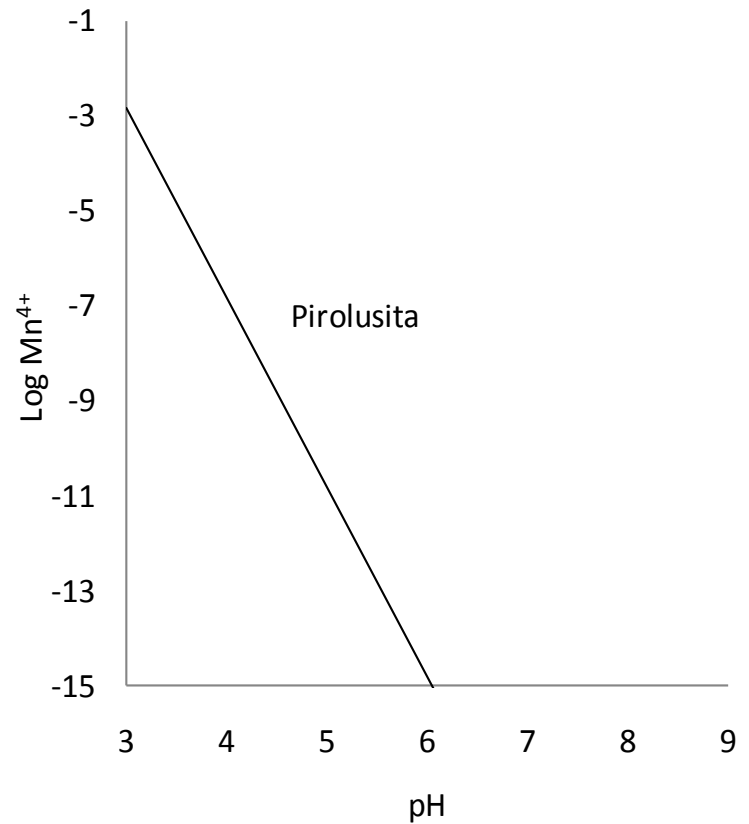
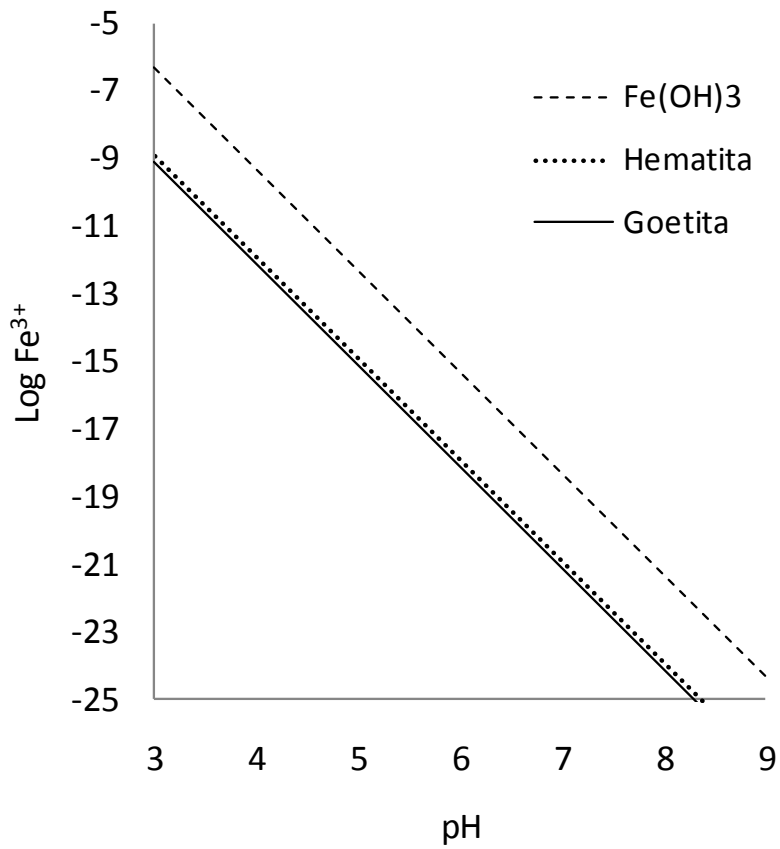


Cuando el pH > 6.0 (6.5) la reacción tiende a la derecha (→)

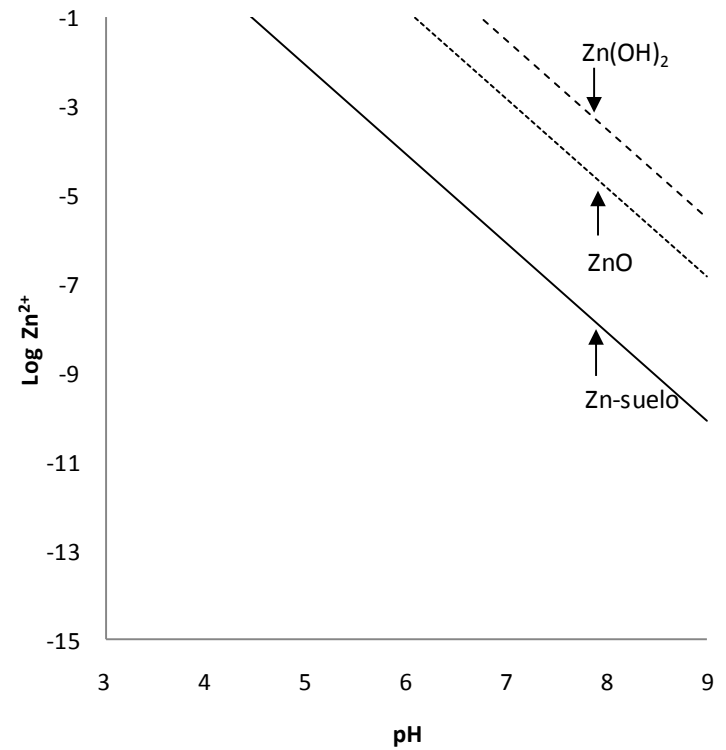
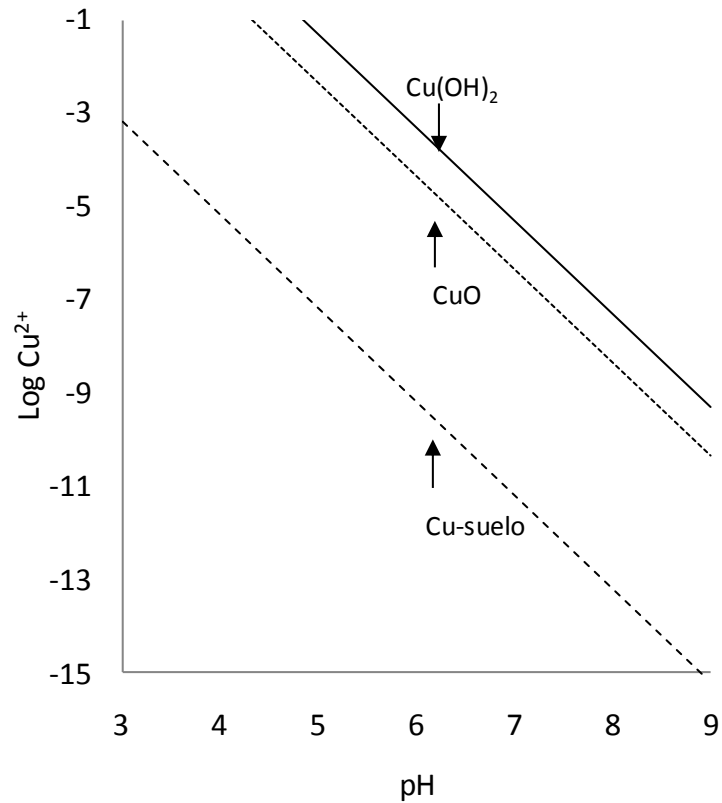
# Compuestos de suelo que controlan la solubilidad de EM catiónicos en el suelo. Fuente: Lindsay (2001).

	Mineral	Reacción de disolución	K
Fe	Fe(OH) <sub>3</sub> (amorfo)	$\text{Fe(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{3.54}$
	Fe(OH) <sub>3</sub> (suelo)	$\text{Fe(OH)}_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{H}_2\text{O}$ ()	$K=10^{2.70}$
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (hematita)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 1.5\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{0.09}$
	FeOOH (goetita)	$\text{FeOOH} + 3\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{-0.02}$
	FePO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (estrengita)	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{-6.85}$
	FeO	$\text{FeO} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	$K=10^{13.48}$
	Fe(OH) <sub>2</sub>	$\text{Fe(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{12.90}$
Mn	MnO <sub>2</sub> (pirolusita)	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Mn}^{4+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{9.17}$
	MnOOH (manganita)	$\text{MnO}_2 + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{41.89}$
	Mn(OH) <sub>2</sub> (pirocroita)	$\text{MnOOH} + 3\text{H}^+ + 1\text{e}^- \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{25.27}$
	MnO (manganosita)	$\text{Mn(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{15.19}$
	MnHPO <sub>4</sub>	$\text{MnO} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	$K=10^{18.39}$
		$\text{MnHPO}_4 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{H}_2\text{PO}_4^-$	$K=10^{-5.74}$
Cu	CuO (tenorita)	$\text{CuO} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	$K=10^{7.66}$
	Cu(OH) <sub>2</sub>	$\text{Cu(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{8.68}$
	CuCO <sub>3</sub>	$\text{CuCO}_3 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$K=10^{8.52}$
	CuSO <sub>4</sub>	$\text{CuSO}_4 \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	$K=10^{3.72}$
	Cu <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	$\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2 + 4\text{H}^+ \leftrightarrow 3\text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$K=10^{2.24}$
Zn	Zn(OH) <sub>2</sub> (amorfo)	$\text{Zn(OH)}_2 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{12.48}$
	ZnO	$\text{ZnO} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$	$K=10^{11.16}$
	ZnCO <sub>3</sub>	$\text{ZnCO}_3 + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$K=10^{7.91}$
	ZnSO <sub>4</sub>	$\text{ZnSO}_4 \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	$K=10^{3.41}$
	Zn <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	$\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+ \leftrightarrow 3\text{Zn}^{2+} + 2\text{H}_2\text{PO}_4^- + 4\text{H}_2\text{O}$	$K=10^{3.8}$

# Efecto del pH en la solubilidad de EM



# Efecto del pH en la solubilidad de EM



# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## ELEMENTOS MENORES CATIÓNICOS

Potencial redox (disponibilidad de e<sup>-</sup>)



Las formas más abundantes son las formas oxidadas Fe<sup>3+</sup> y Mn<sup>4+</sup> es decir, precipitados en formas insolubles (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeOOH, MnO).

La reducción ocurre en la rizosfera por acción de bacterias que usan estos compuestos oxidados como aceptores de e<sup>-</sup>s.

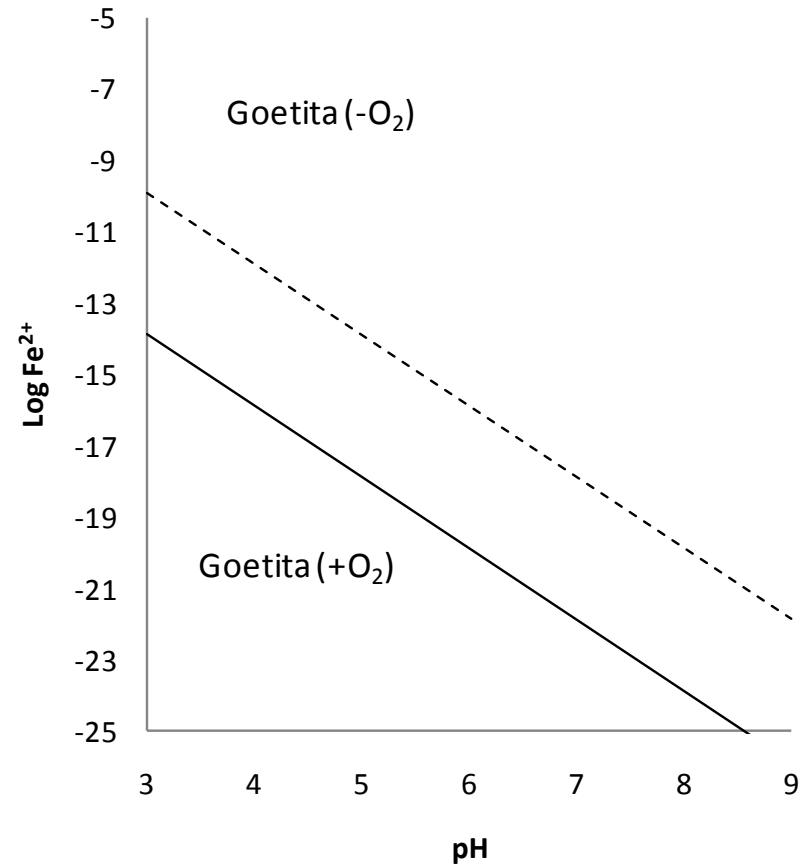
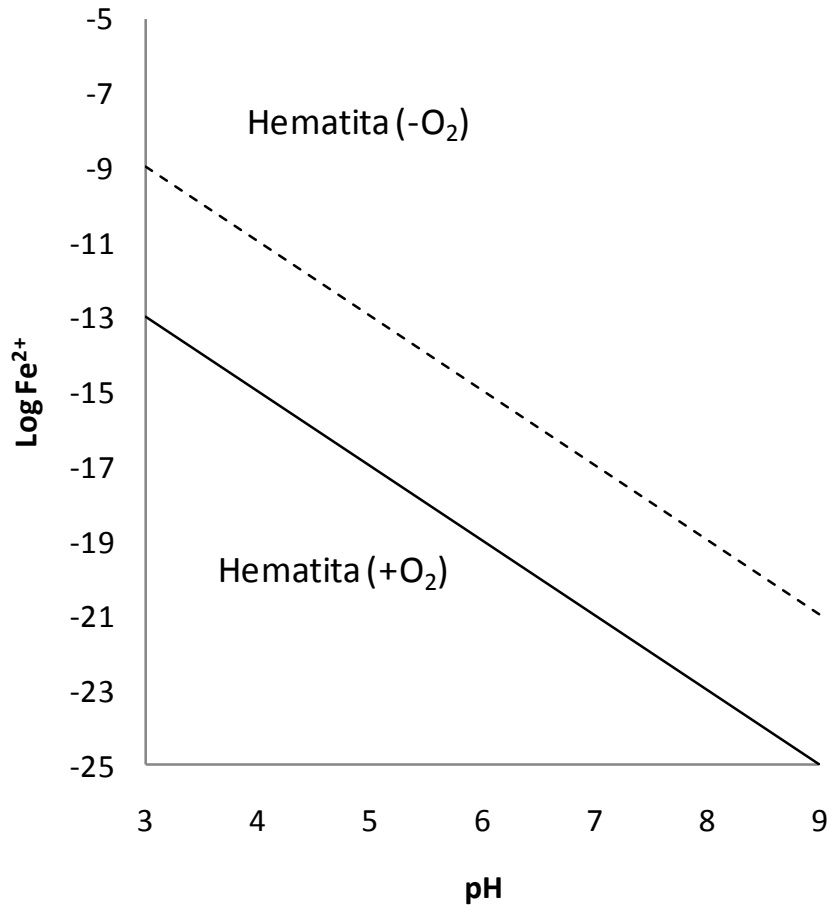
# Reacciones redox en suelos y sedimentos llevadas a cabo por acción bacterial. Fuente: Mulleri (1999).

Elemento	Especies	Reacción	Microorganismo
Fe	Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup>	Oxidación: Fe <sup>2+</sup> ↔ Fe <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup> Reducción: Fe <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup> ↔ Fe <sup>2+</sup>	<i>Acidithiobacillus ferroxidans</i> <i>Geobacter</i> , <i>Desulfovibrio</i> , <i>Pseudomonas</i>
Mn	Mn <sup>4+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	Oxidación: Mn <sup>2+</sup> ↔ Mn <sup>4+</sup> + 2e <sup>-</sup> Reducción: Mn <sup>4+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ Mn <sup>2+</sup>	<i>Arthrobacter</i> , <i>Pseudomonas</i> <i>Bacillus</i> , <i>Geobacter</i> , <i>Pseudomonas</i>
Hg	Hg <sup>2+</sup> , Hg <sup>0</sup>	Oxidación: Hg <sup>0</sup> ↔ Hg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> Reducción: Hg <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ↔ Hg <sup>0</sup>	<i>Bacillus</i> , <i>Pseudomonas</i> <i>Chlorella</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Streptomyces</i>
Cr	Cr <sup>6+</sup> , Cr <sup>3+</sup>	Oxidación: Cr <sup>3+</sup> ↔ Cr <sup>6+</sup> + 3e <sup>-</sup> Reducción: Cr <sup>6+</sup> + 3e <sup>-</sup> ↔ Cr <sup>3+</sup>	No realizada por microorganismos <i>Aeromonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Pseudomonas</i>
Se	Se <sup>6+</sup> , Se <sup>4+</sup> , Se <sup>0</sup> , Se <sup>2-</sup>	Oxidación: Se <sup>2-</sup> ↔ Se <sup>0</sup> + 2e <sup>-</sup> Reducción: SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> + 8e <sup>-</sup> ↔ Se <sup>2-</sup>	<i>Bacillus</i> , <i>Acidithiobacillus</i> <i>Clostridium</i> , <i>Desulfovibrio</i> , <i>Microccus</i>

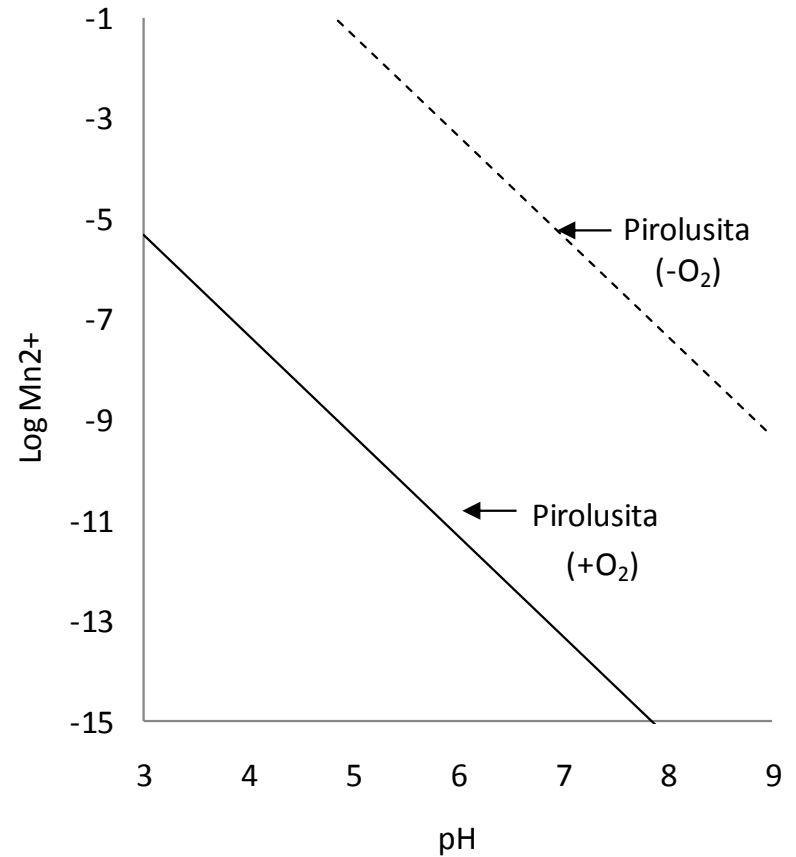
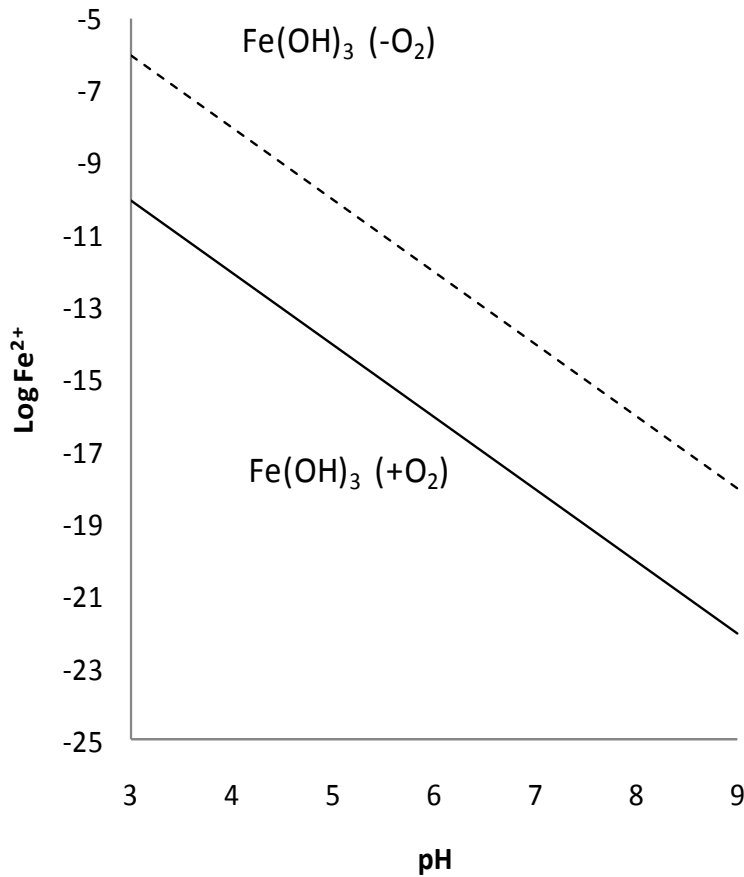
Potencial de reducción estándar para algunas reacciones de importancia metabólica para microorganismos del suelo. Fuente: Fuhrmann (1999).

Reacción	E'° (V)
$O_2 + 2e^- + 2H^+ \leftrightarrow H_2O$	+0.82
$Fe^{3+} + e^- \leftrightarrow Fe^{2+}$	+0.77
$NO_3^- + 1 e^- \leftrightarrow NO_2^-$	+0.43
$NO_2^- + 1 e^- \leftrightarrow NO$	+0.36
$Mn^{4+} + 2e^- \leftrightarrow Mn^{2+}$	
$CO_2 + 4e^- + 4 H^+ \leftrightarrow CH_4$	-0.24
$SO_4^{2-} + 8e^- + 2H^+ \leftrightarrow H_2S$	-0.23
$2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2$	-0.42

# Concentración de elementos menores catiónicos ( $\text{Fe}^{2+}$ y $\text{Mn}^{2+}$ ) en función del pH.



# Concentración de elementos menores catiónicos ( $\text{Fe}^{2+}$ y $\text{Mn}^{2+}$ ) en función del pH.



# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## ELEMENTOS MENORES CATIÓNICOS

P (disponibilidad de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ):



**Cuando hay exceso de P disponible se precipitan estos EM**

# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

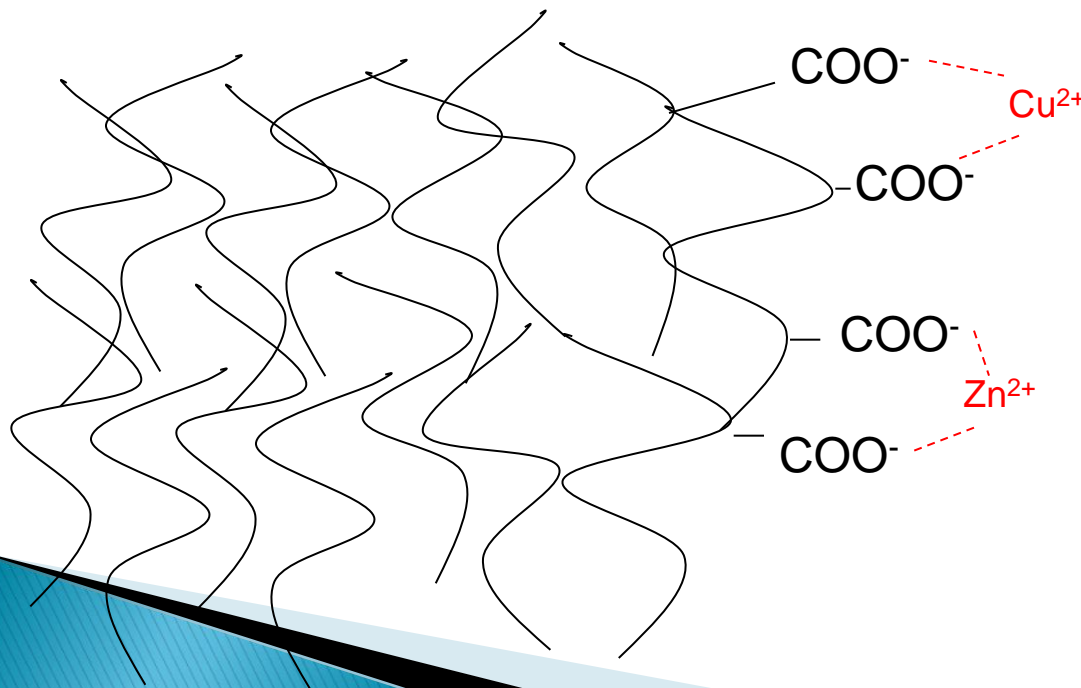
## Elementos Menores catiónicos

Efecto de la materia orgánica humificada: grupos carboxilatos del humus puede acomplejar los EM cationes en formas poco disponibles:

# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

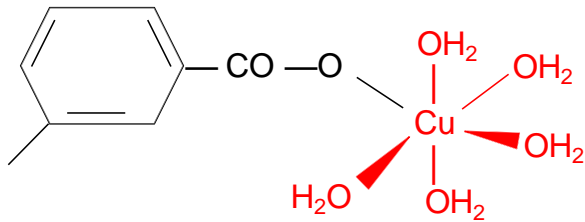
## Elementos Menores catiónicos

Efecto de la materia orgánica humificada: grupos carboxilatos del humus puede acomplejar los EM cationes en formas poco disponibles:

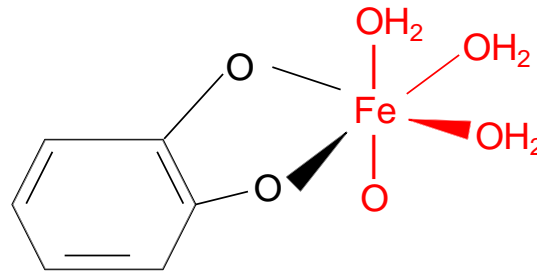


Las formas complejadas no son fácilmente intercambiables. (fijación de EM)

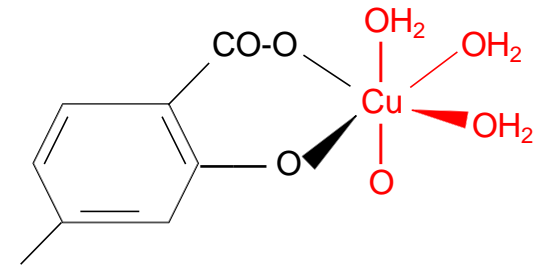
# Diagrama que ilustra la retención de EM catiónicos por grupos funcionales de la materia orgánica humificada del suelo.



Quelato de Cu  
Grupo carboxílico



Catecolato-Fe

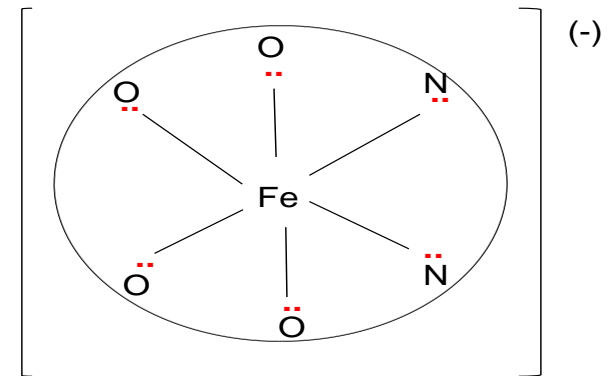
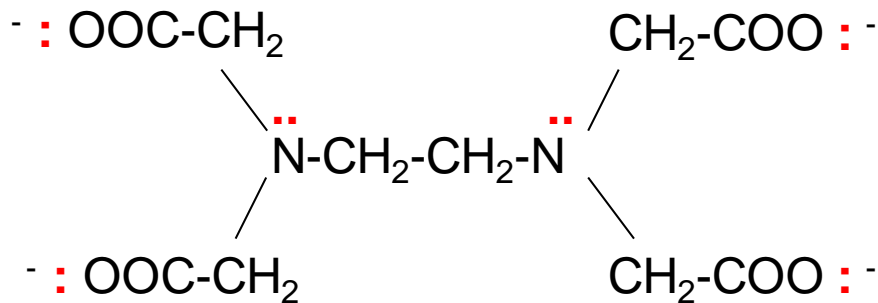


Anillo de quelato de Cu  
Grupo carboxílico-fenólico

# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

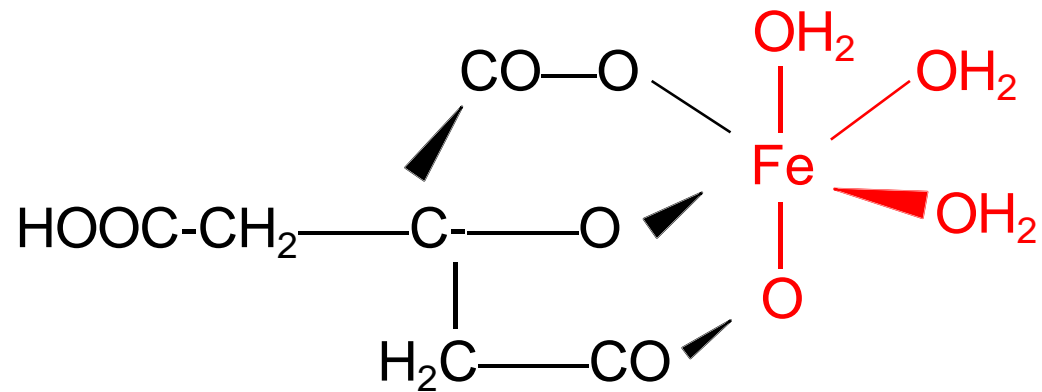
## Elementos Menores catiónicos

Agentes quelatantes: se forman complejos solubles que pueden ser bio-disponible (absorbidos por las raíces, bacterias, hongos)



Izquierda: estructura del EDTA, note las cuatro cargas eléctricas de los grupos carboxilatos y los 6 pares de e<sup>-</sup>. Derecha: diagrama que ilustra la formación del complejo EDTA-Fe<sup>3+</sup>. Note los 6 enlaces y la carga negativa remanente.

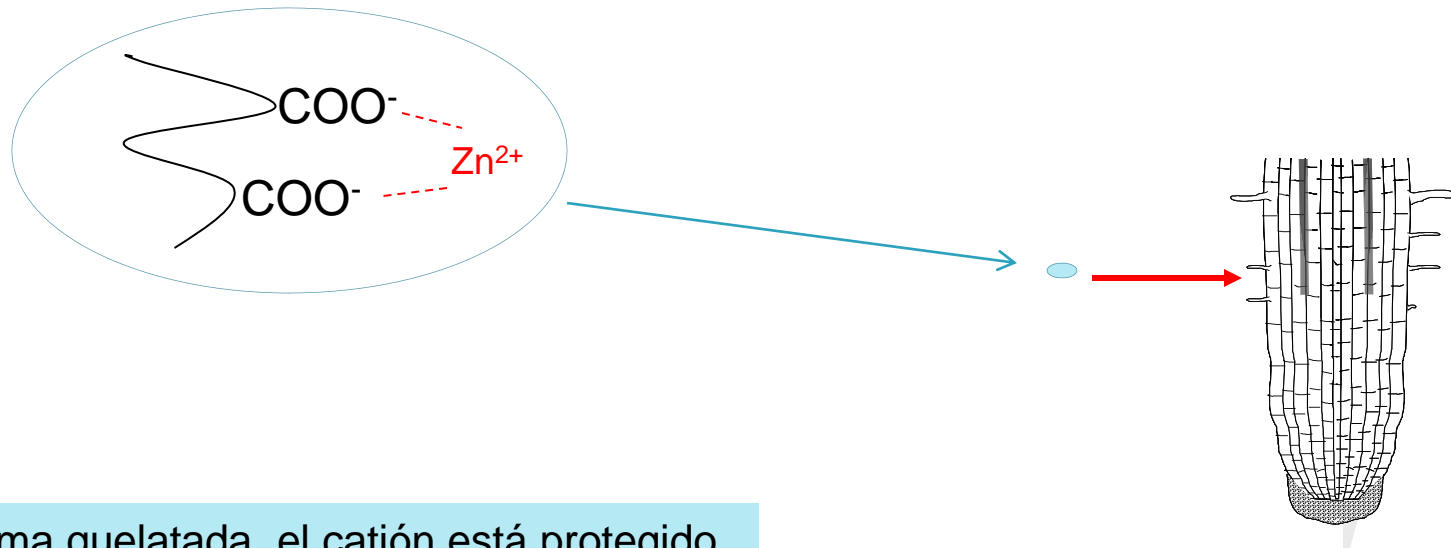
## Acido cítrico como agente quelatante



# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

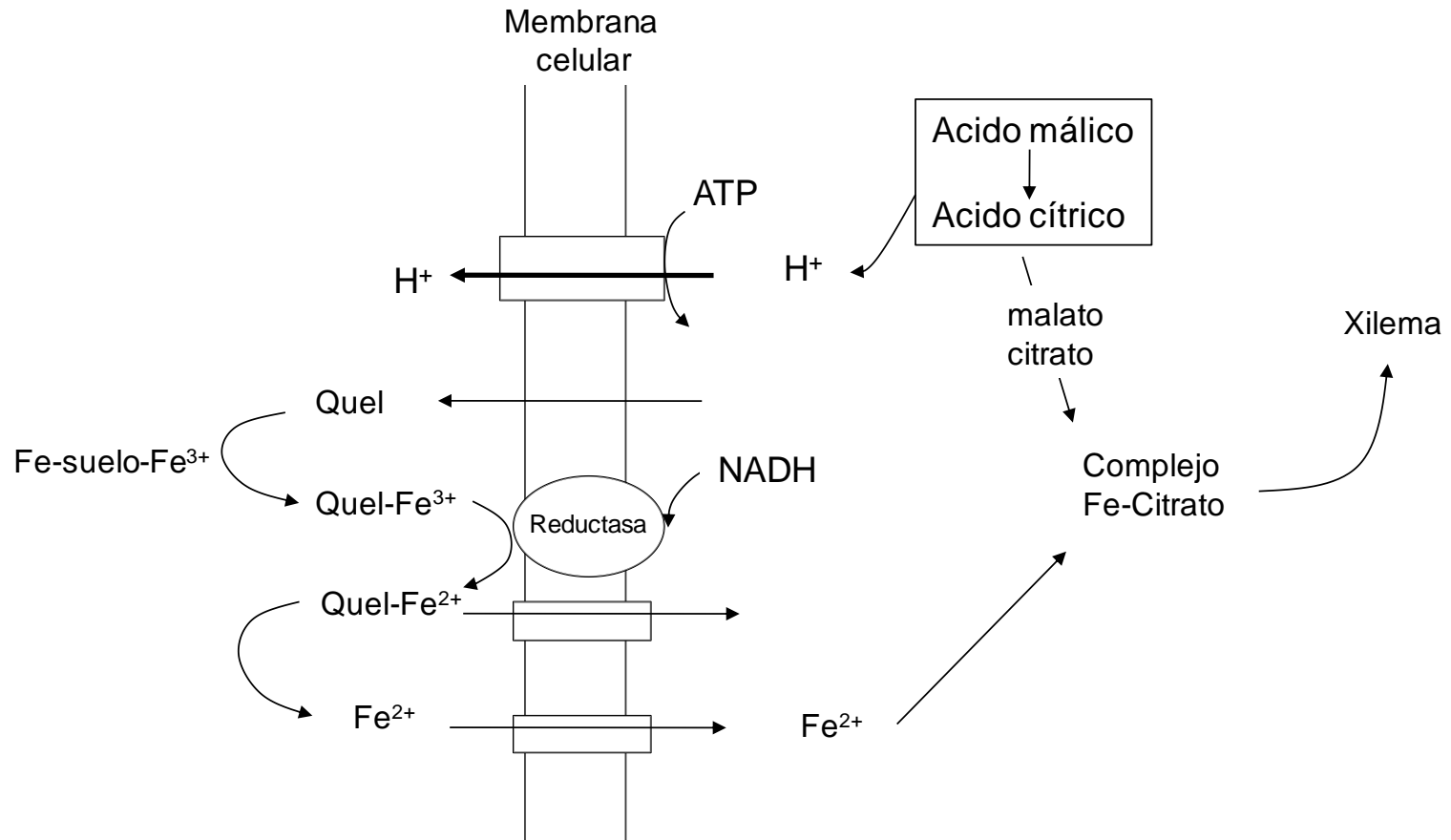
## Elementos Menores catiónicos

Agentes quelatantes: se forman complejos solubles que pueden ser bio-disponible (absorbidos por las raíces, bacterias, hongos)



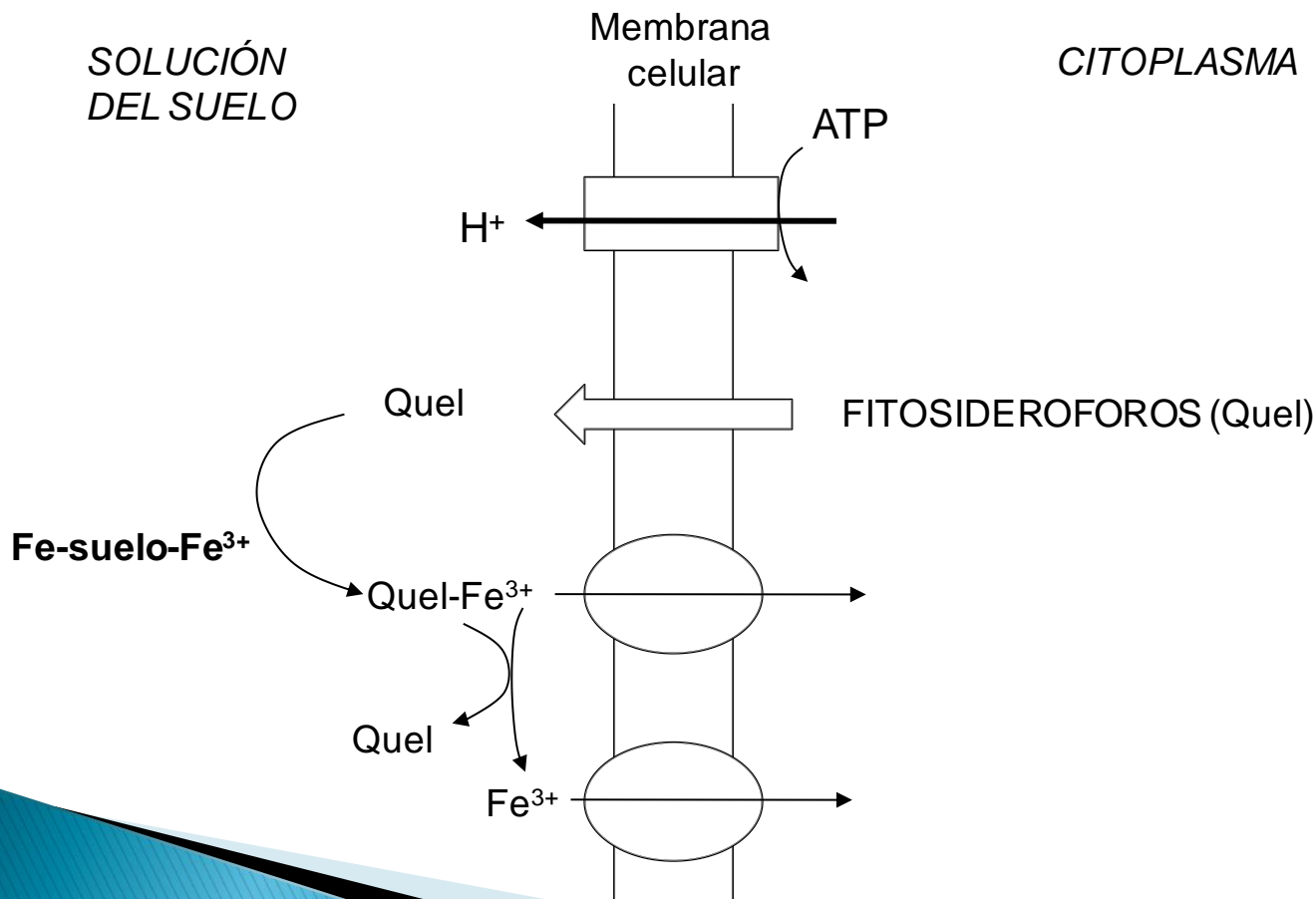
En forma quelatada, el catión está protegido y no se precipita con  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , ni se acompleja con el humus.

Diagrama que ilustra la reducción del complejo quelato- $\text{Fe}^{3+}$  por una reductasa-NADH. Luego, el  $\text{Fe}^{2+}$  libre o complejado es absorbido. Adaptado de Kochian (1991).



Dicotiledóneas y monocotiledóneas  
no-poáceas

Diagrama que ilustra la liberación de fitosideroforos y la posterior formación del complejo quelato- $\text{Fe}^{3+}$ . Adaptado de Kochian (1991).



pastos y muchas otras gramíneas poáceas

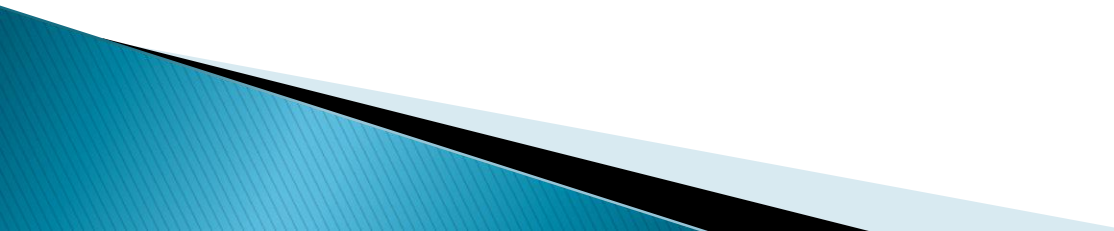
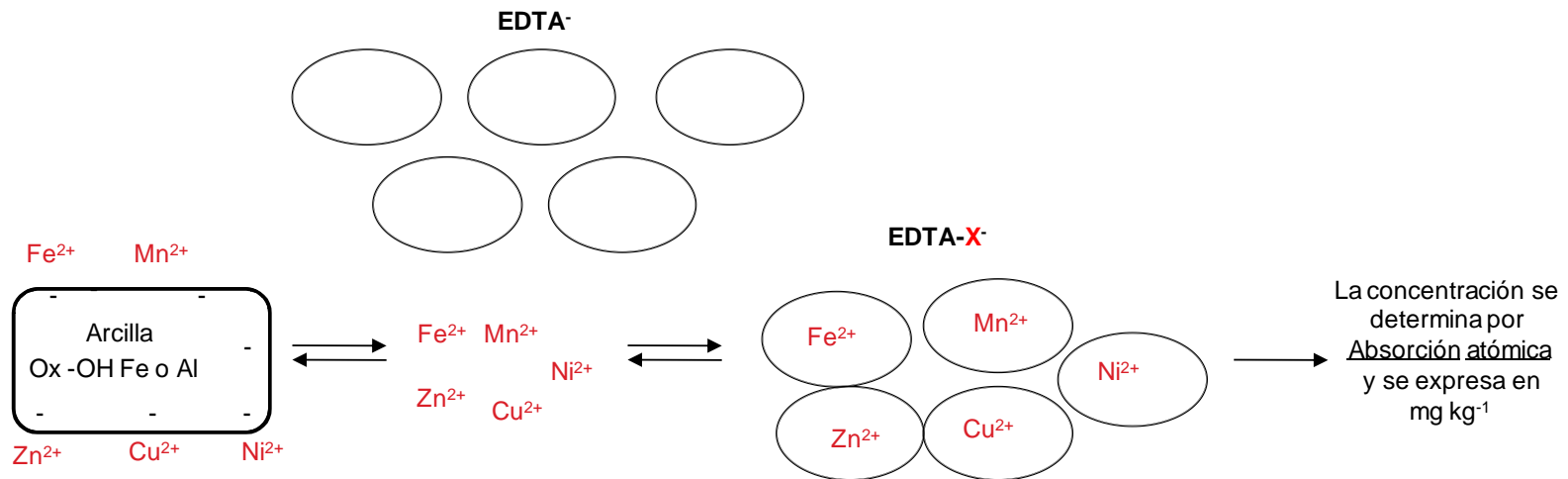
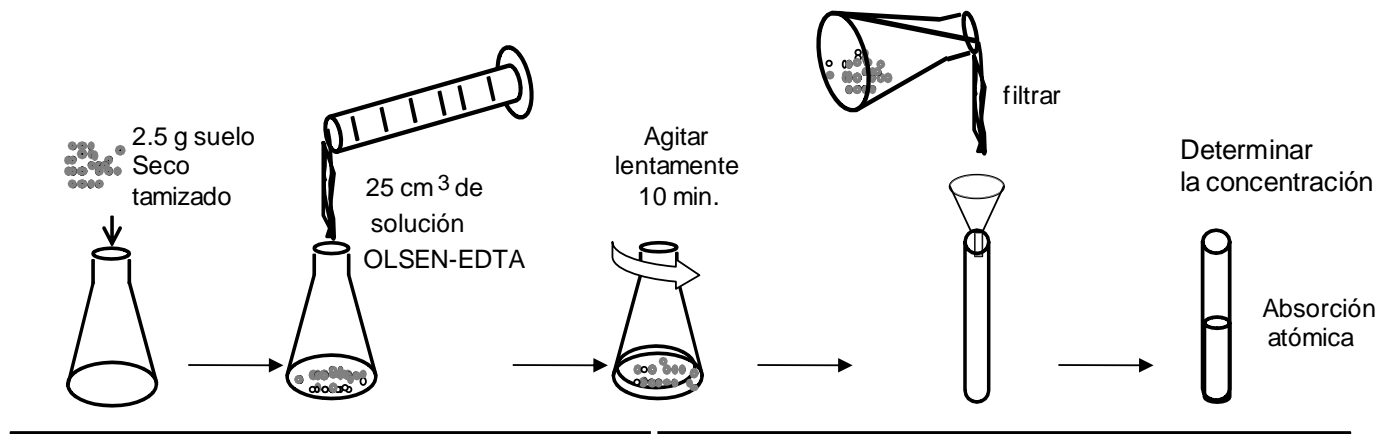
- ▶ Fitosideroforos: producidos por las plantas cuando hay -Fe (también -Mn, -Zn, -Cu)
  - ▶ Sideróforos: producidos por bacterias
  - ▶ Estos son más afines por Fe que los quelatantes sintéticos (EDTA)
- 

Diagrama que ilustra la extracción de EM catiónicos del suelo a través de agentes quelatantes y su posterior determinación por Absorción Atómica.



Interpretación de la concentración de EM catiónicos extraídos por el método Olsen-EDTA. Fuente: †Lora (1998), †ICA (1992), ††Osorio (2012).

Elemento	Rango adecuado para cultivos en general (mg kg <sup>-1</sup> ) †	Rango adecuado para cultivos intensivos (mg kg <sup>-1</sup> ) ††	Disponibilidad
Fe	<20	<50	Baja
	20-50	50-100	Suficiente
	>50	>100	Alta
Mn	<5	<10	Baja
	5-10	10-15	Suficiente
	>10	>15	Alta
Cu	<1	<3	Baja
	1-3	3-6	Suficiente
	>3	>6	Alta
Zn	<1.5	<3	Baja
	1.5-5	3-6	Suficiente
	>5	>6	Alta

## Fuentes fertilizantes de EM cationicos comúnmente usados en la agricultura.

Fertilizante	Formula química	Concentración (%)
Sulfato de Fe	$\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	33-20
Sulfato de Mn	$\text{MnSO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	24-30
Sulfato de Cu	$\text{CuSO}_4$ - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	35-25
Sulfato de Zn	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	36-22
Quelato (EDTA)		
Quelato de Fe	Fe-EDTA-Na	9-12
Quelato de Mn	Mn-EDTA-Na	9-12
Quelato de Cu	Cu-EDTA- $\text{Na}_2$	9-12
Quelato de Zn	Zn-EDTA- $\text{Na}_2$	9-12

Concentración de EM ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en enmiendas orgánicas comúnmente usadas en la agricultura. Fuente: Sadeghian (2009).

Material	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Pulpa de café	480	195	21	42	67
Gallinaza	360	140	85	245	48
Porcinaza	132	144	25	250	34
Harina sangre	6750	25	9	54	69

Cambios en la disponibilidad de EM ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en dos Andisoles de Antioquia (Colombia) cultivados con pasto kikuyo en función de la adición de porcinaza cada pastoreo durante 10 años. Análisis hechos con el método Olsen-EDTA. Datos N.W. Osorio.

Sitio	Tratamiento	Fe	Mn	Cu	Zn	B
Don Matías, Antioquia	Control	495	5	3	5	0.2
	Aplicación	671	14	8	22	1.2
Rionegro, Antioquia	Control	186	6	2	5	0.3
	Aplicación	241	16	15	42	1.1

# Cultivos altamente sensibles a bajos niveles de EM catiónicos en el suelo.

-Fe	-Mn	-Cu	-Zn
Cítricos	Cítricos y otros	Árboles	Frijol
Frijol	frutales	Árboles frutales	Cítricos
Árboles frutales	Ornamentales	Ornamentales	Aguacate
Sorgo	Alfalfa	Zanahoria	Ornamentales
Vid	Papa, Fresa	Remolacha	Arroz
Ornamentales	Cebolla	Cebolla	Maíz
Soya	Soya	Alfalfa	Cebolla
Hortalizas	Manzana	Arroz	Soya
Maní	Vid, Remolacha	Lechuga	Manzana
	Lechuga	Espinaca	Café
	Espinaca	Tabaco	

## Dosis:

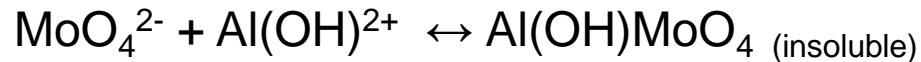
Fe: 1-5 kg /ha (fuente sulfatos)

Mn, Cu, Zn: 1-3 kg/ha (fuente sulfatos)

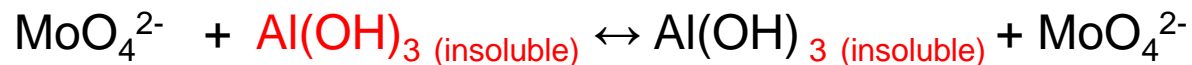
# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## Elementos Menores anionicos

pH y Aluminio:



Al aplicar cal, se precipitan las formas activas de Al en el suelo y se mejora la disponibilidad del molibdato.



pH= 6.0 ✓

# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## Elementos Menores molecular ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )

pH

Flujo masal

Retención de B (MO y arcillas)

# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## Elementos Menores molecular ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )

pH :

$\text{H}_3\text{BO}_3^0$  (forma altamente soluble= biodisponible)

$\text{H}_3\text{BO}_3^0 + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{BO}_3^-$  (forma poco soluble= no-biodisponible)

**(pH  $\geq$  7.2)**



# Factores que controlan su biodisponibilidad en el suelo y su absorción

## Elementos Menores molecular ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ )

Flujo masal: al ser tan soluble, el  $\text{H}_3\text{BO}_3^\circ$  tiende a estar en la solución del suelo.

Cuando la planta absorbe la solución del suelo, genera un arrastre de los solutos disueltos. A mayor ET, mayor será su flujo en la solución del suelo.

Mayor ET: aire tiene bajo humedad relativa, alta temperatura, suficiente humedad en el suelo.

Se requiere que haya agua en el suelo y suficiente ET, esto permite el flujo de  $\text{H}_3\text{BO}_3^\circ$  hacia las raíces para luego ser absorbido.

# Rangos adecuados de su disponibilidad de EM para cultivos

EM	Rango adecuado (mg kg <sup>-1</sup> ) (=ppm)	
	Otros cultivos (ICA, 1992)	Crisantemo (Herrón, 1993)
Fe	25-50	80-100
Mn	5-10	12-15
Cu	1-3	3-4
Zn	1-5	3-6

Fe, Mn, Cu, Zn: método Olsen-EDTA, Absorción atómica.

pH adecuado: 5.8-6.2

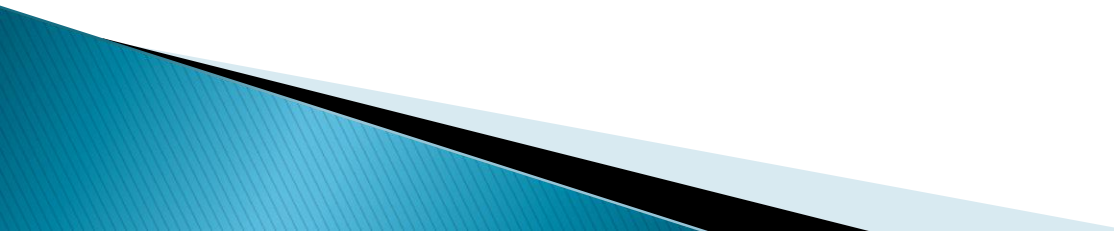
# Rangos adecuados de su biodisponibilidad para cultivos de flores

EM	Rango adecuado (mg kg <sup>-1</sup> ) (=ppm)	
	Otros cultivos (ICA, 1992)	Crisantemo (Osorio, Patiño, Herrón, 1991)
B	0.3–0.7 0.5–1.0 Café	1.0–2.0

B: método agua caliente, espectroscopia (azometina-H)

# Dinámica de EM en cultivos intensivos. Estudio de caso

Análisis de suelos de cultivos de crisantemo en el Oriente Antioqueño:

- ▶ Lab Suelos de la UNC–Medellín (400)
  - ▶ Soil & Plant Lab– California, USA (500)
  - ▶ Estudio retrospectivo de base de datos
  - ▶ Lotes con 20+ años bajo cultivo
- 

# Dinámica de EM en cultivos intensivos de flores. Estudio de caso

Altas aplicaciones de cal.

Altas aplicaciones de fertilizantes fosfóricos solubles.

Adiciones frecuentes de N, K, EM (particularmente B).

Adiciones de enmiendas orgánicas (compost).

Desinfección de suelo y uso frecuente de fungicidas.



# Dinámica de EM en cultivos intensivos de flores. Estudio de caso

pH del suelo: 6-7 (hasta 7.5)

P-Bray II: 120-200 mg kg<sup>-1</sup> (hasta 300 mg kg<sup>-1</sup> )

Ca: 20-35 cmolc kg<sup>-1</sup>

Mg: 4-8 cmolc kg<sup>-1</sup>

K: 0.8-1.5 cmolc kg<sup>-1</sup>

ClCef.: 25-40 cmolc kg<sup>-1</sup>

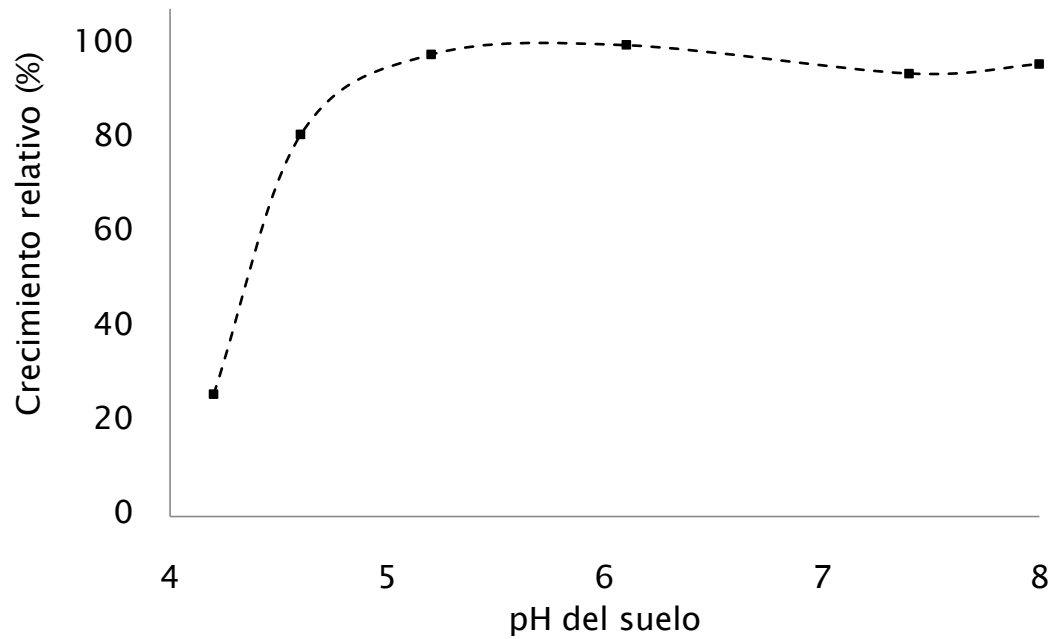
NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: 100-250 mg kg<sup>-1</sup>

Cond. Electrica: 1.0-2.5 dS m<sup>-1</sup>

# Muestreo de Suelos

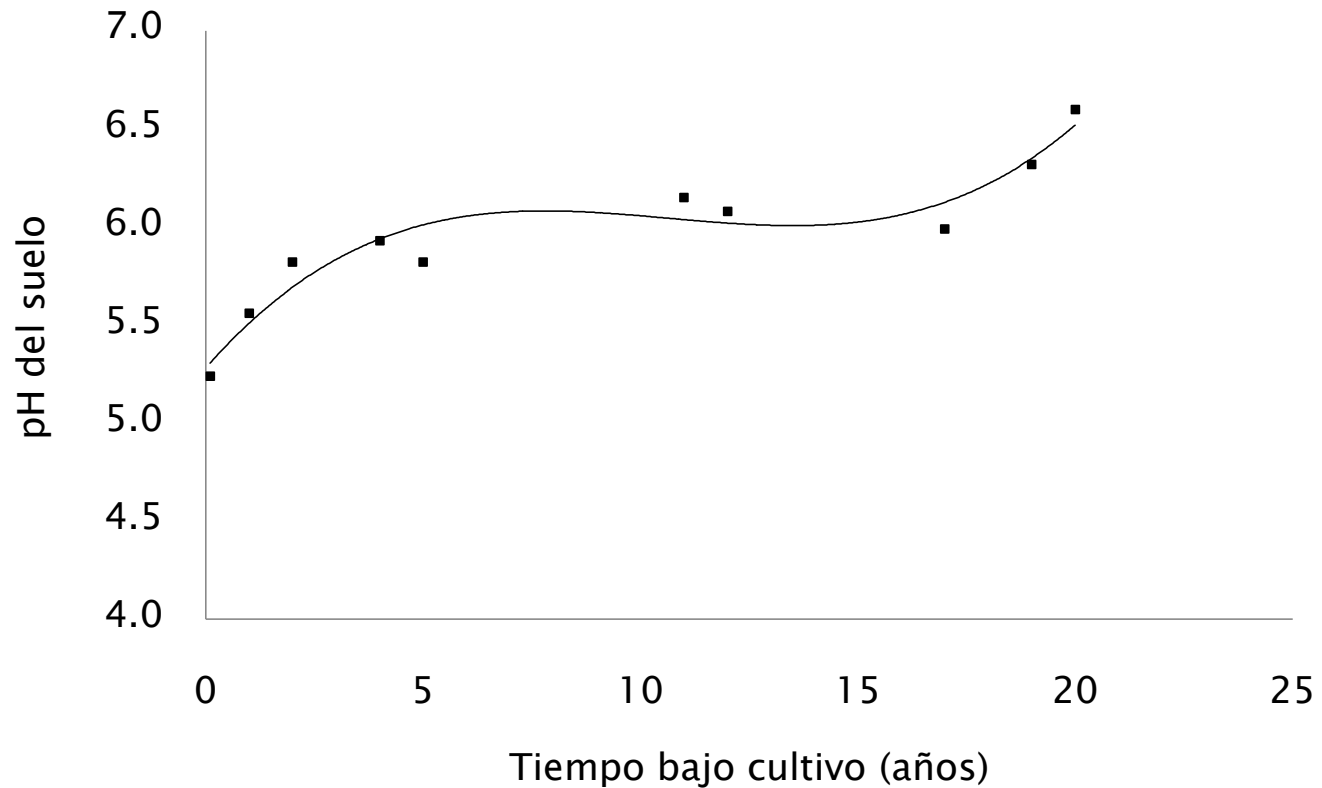


## Efecto del pH del suelo en el crecimiento relativo de crisantemo



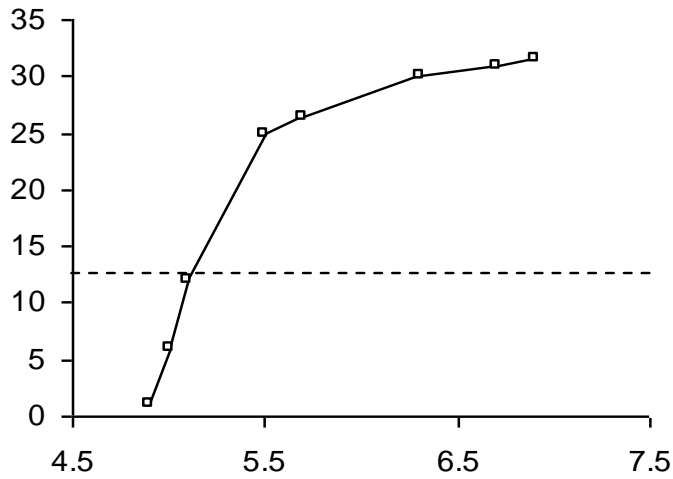
Fuente: Kofranek

# pH del suelo en función del tiempo bajo cultivo intensivo en crisantemo



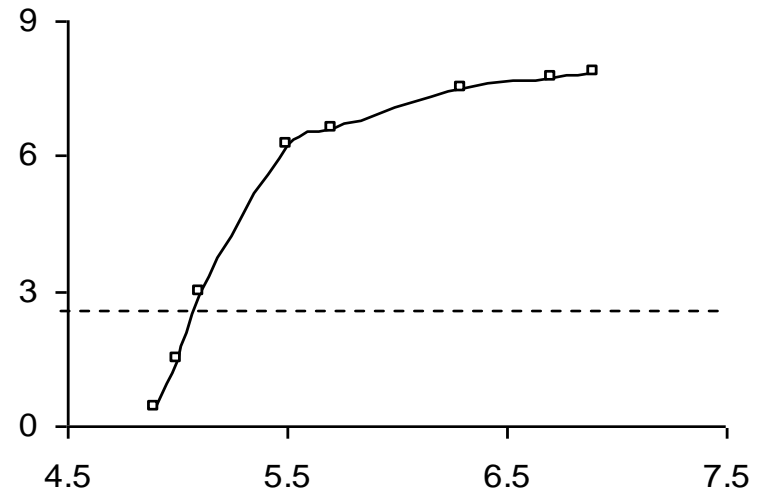
# Relación entre pH (encalamiento) y biodisponibilidad de Ca y Mg

Ca ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )



pH suelo

Mg ( $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ )

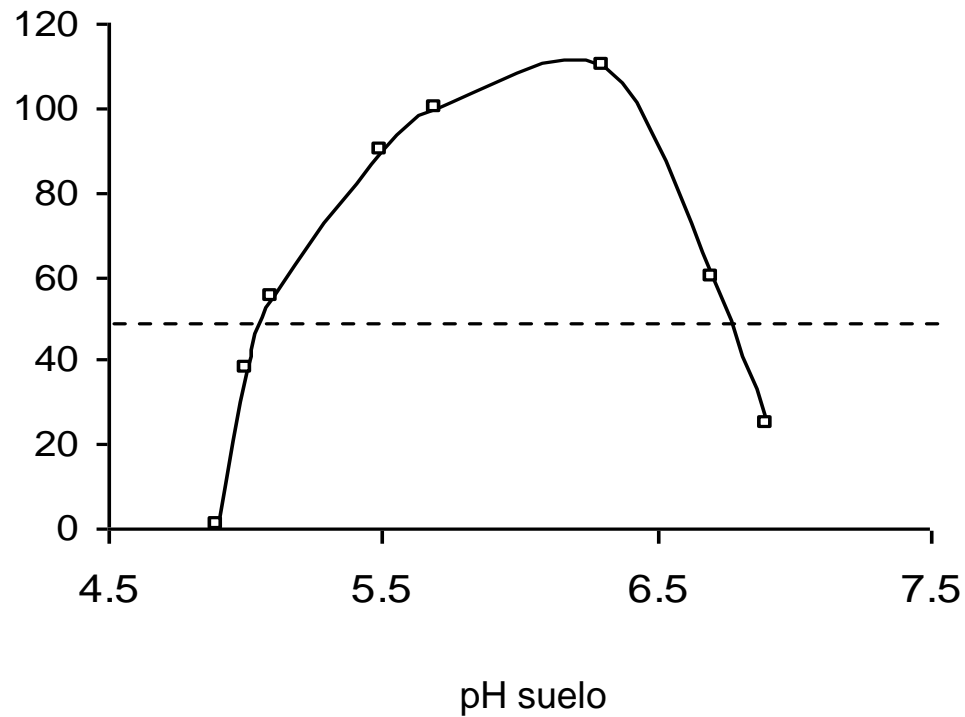


pH suelo

Fuente: Osorio, 1996. Cambio en... suelos cultivados intensivamente con flores

# RELACIÓN ENTRE pH (ENCALAMIENTO) Y BIODISPONIBILIDAD DE FOSFATO

P-Olsen ( $\text{mg kg}^{-1}$ )

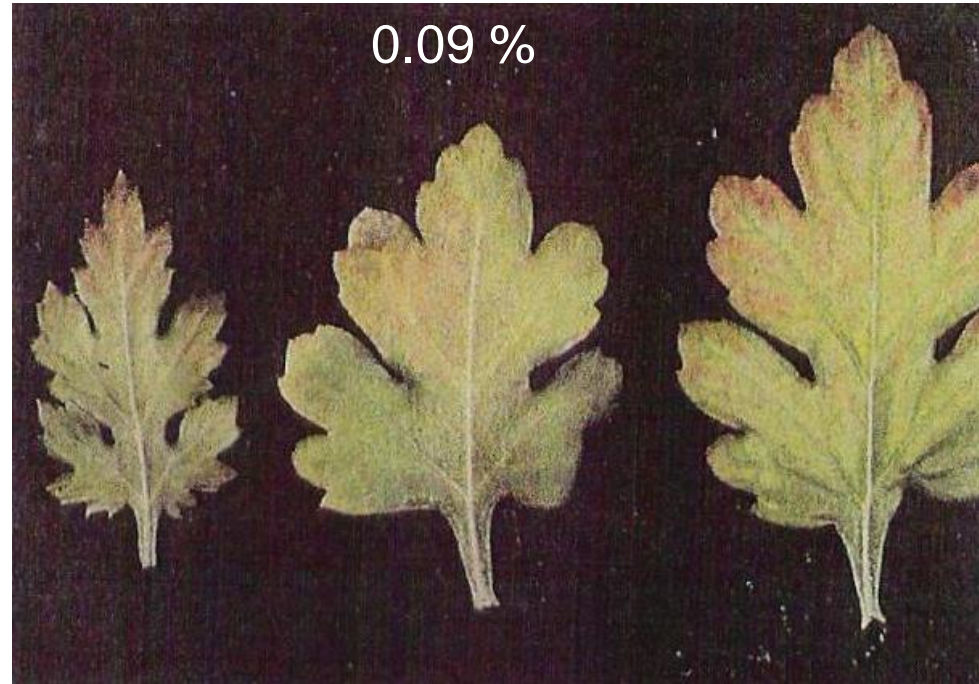


Fuente: Osorio, 1996. Cambio en... suelos cultivados intensivamente con flores

# P deficiencia

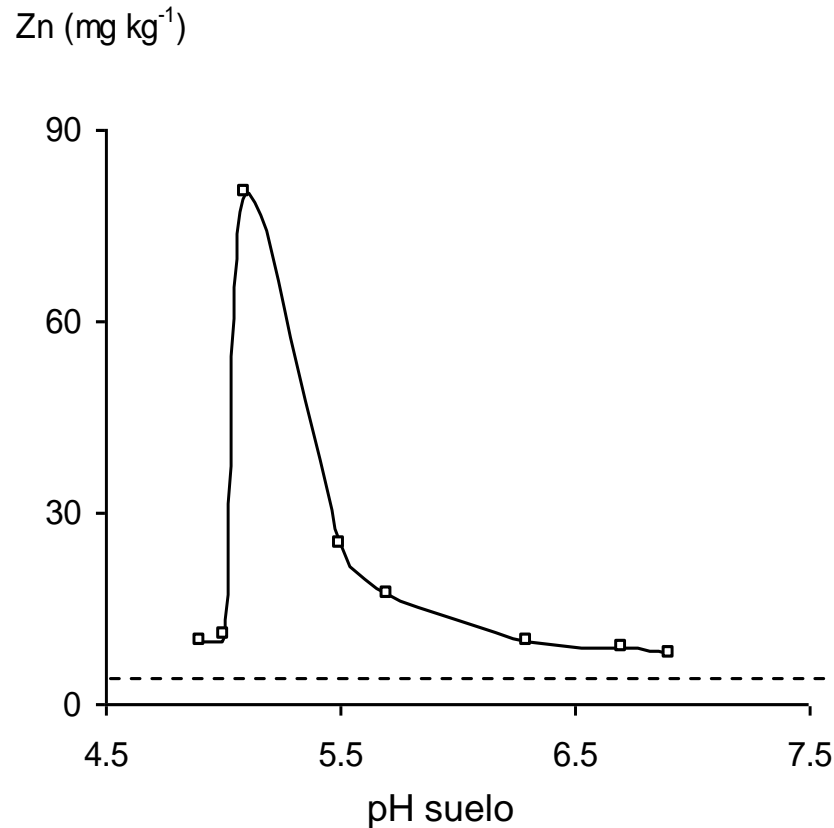


Ccto restringido  
poco dslo de botones florales  
retraso en floración  
muerte de hojas maduras



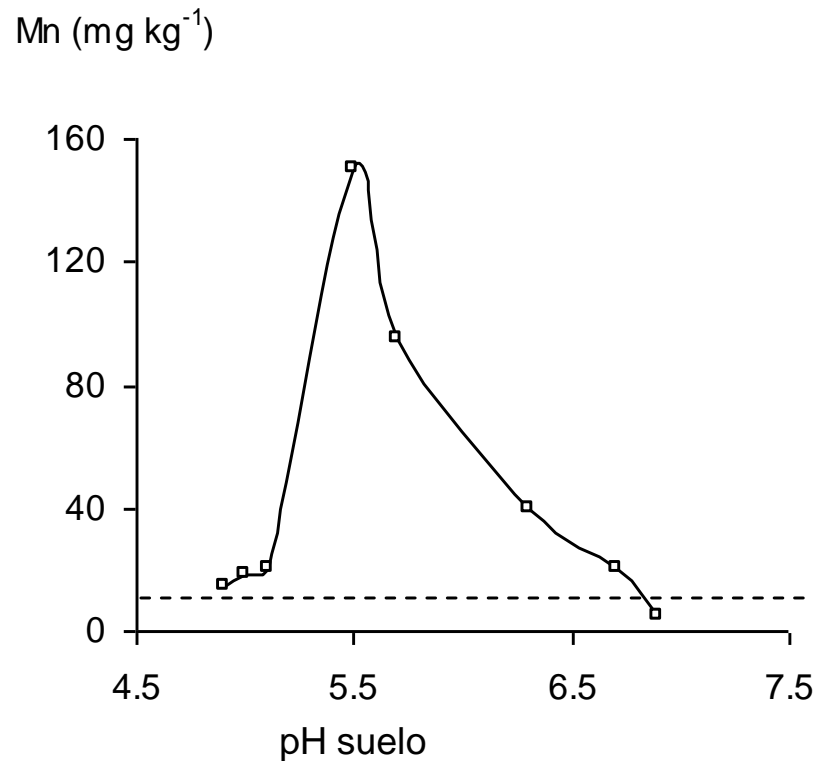
0.2 - 0.4% ✓

# Relación entre pH (encalamiento) y biodisponibilidad de Zn



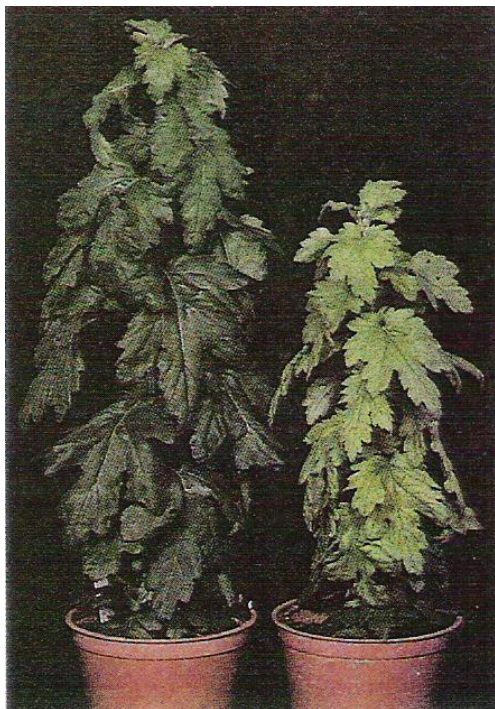
Fuente: Osorio, 1996. Cambio en... suelos cultivados intensivamente con flores

# Relación entre pH (encalamiento) y biodisponibilidad de Mn



Fuente: Osorio, 1996. Cambio en... suelos cultivados intensivamente con flores

135  $\mu\text{g/g}$  8  $\mu\text{g/g}$



Retraso en floración

100  $\mu\text{g/g}$  19  $\mu\text{g/g}$  14  $\mu\text{g/g}$



Clorosis intervenal

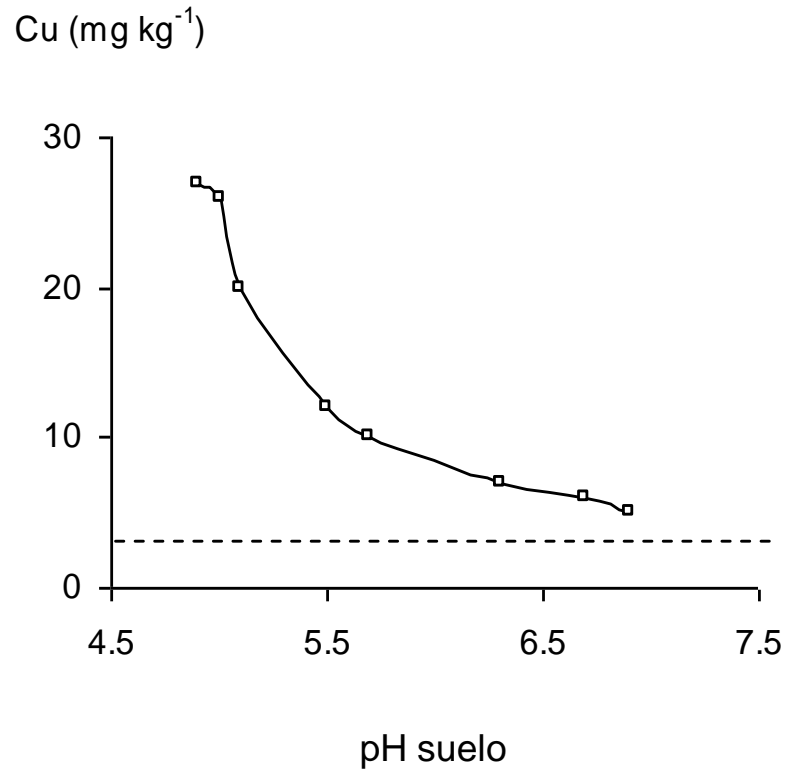


Retraso en floración

50-300  $\mu\text{g/g}$  ✓

# Mn deficiencia

# Relación entre pH (encalamiento) y biodisponibilidad de Cu



Fuente: Osorio, 1996. Cambio en... suelos cultivados intensivamente con flores

# Cu deficiencia



Retraso en floración



Entrenudos cortos



Hojas malformadas



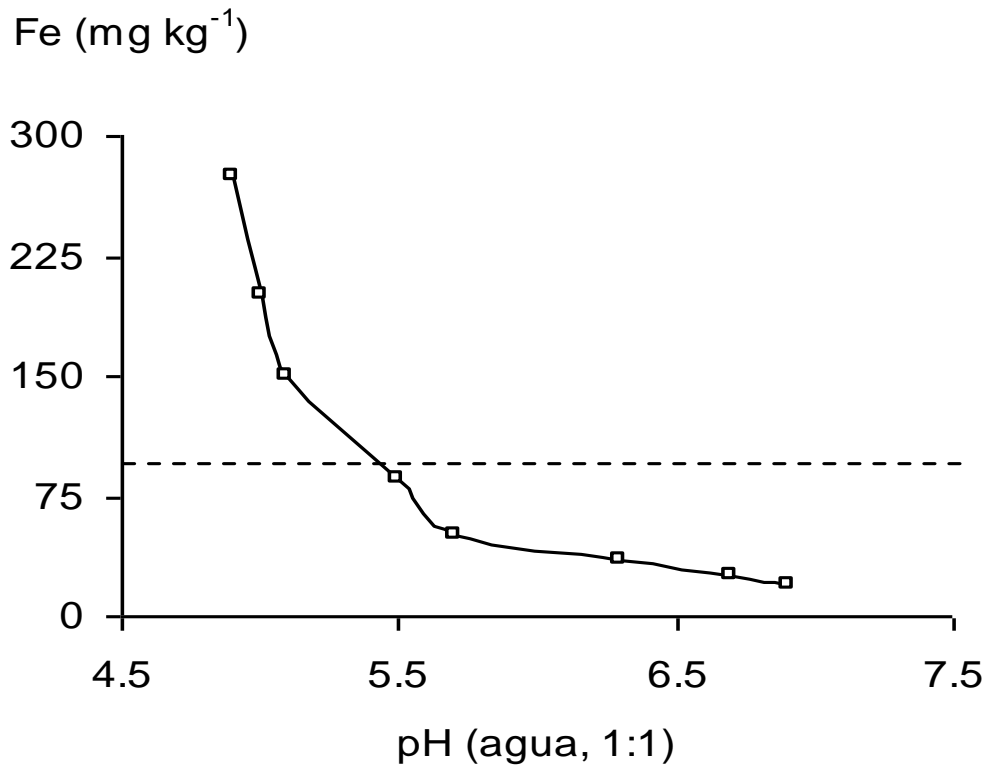
9  $\mu\text{g/g}$

3  $\mu\text{g/g}$

Clorosis intervenal & marginal

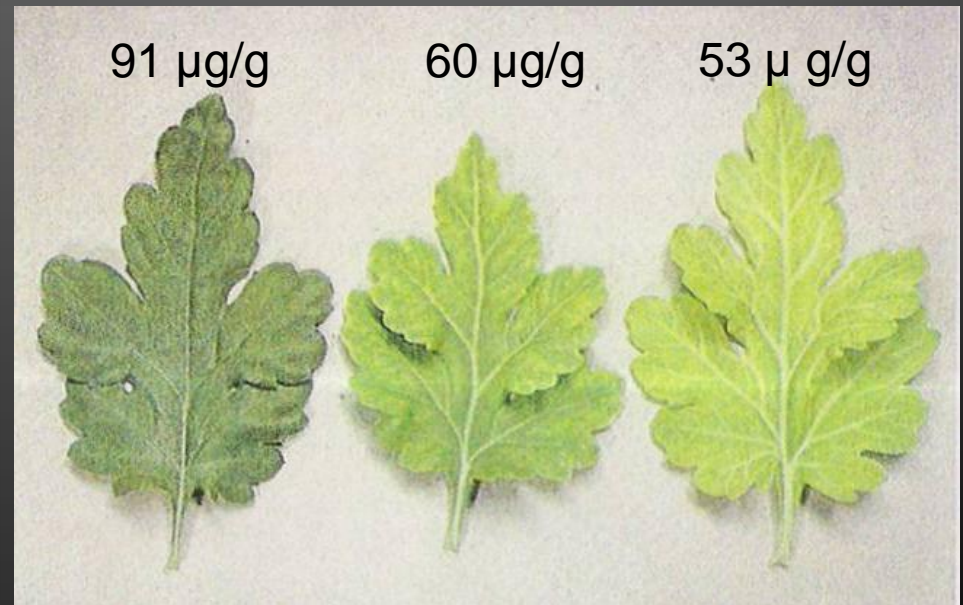
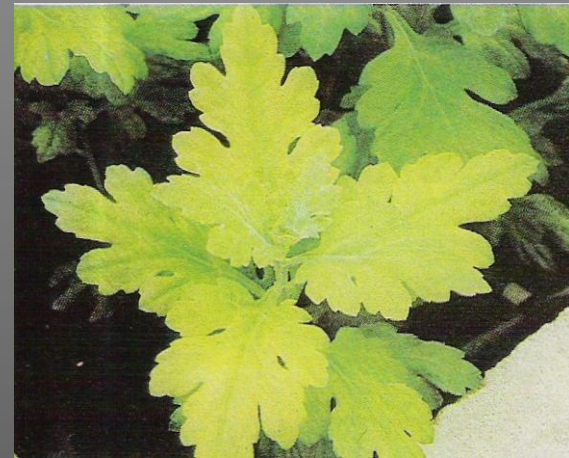
7-20  $\mu\text{g/g}$  ✓

# Relación entre pH (encalamiento) y biodisponibilidad de Fe



Fuente: Osorio, 1996. Cambio en... suelos cultivados intensivamente con flores

# Deficiencia de Fe

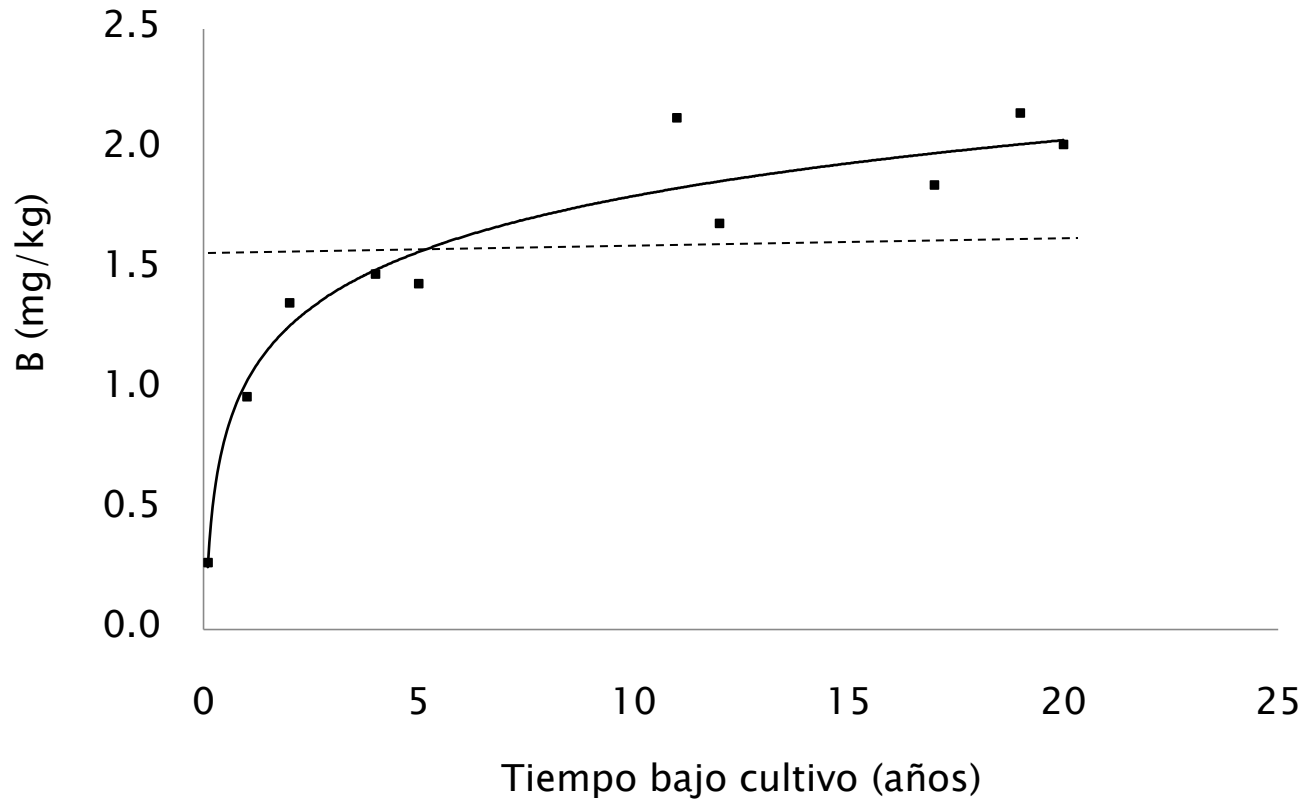


Clorosis severa, hojas jóvenes pálidas

80-200 µg/g



## B en el suelo en función del tiempo bajo cultivo intensivo en crisantemo



# Toxicidad por B



30-70  $\mu\text{g/g}$  ✓

>100  $\mu\text{g/g}$  ↑

## Modelos de regresión significativos ( $P \leq 0.001$ ) entre algunas variables

Variable dependiente	Modelo
pH	= $5.401 + 0.0234 (\text{Ca}) - 0.158 \text{ Al}$
P	= $-186.39 + 4.26(\text{Ca}) + 37.96 (\text{pH})$
Al	= $6.217 - 1.01(\text{pH})$
Fe	= $228.62 - 6.078 (\text{Ca})$
CE	= $0.975 + 0.28(\text{K}) + 0.0004(\text{NO}_3)$

# Guías de fertilización de Fe para cultivos de flores

Fe suelo (mg/kg)	Fe a aplicar a la siembra (g/era)
<40	45
40-60	35
60-100	30
100-120	20
>120	0

Fuente: sulfato de Fe  
(pH < 6.0, bajo P)

Quelato de Fe  
(pH > 6.0, alto P)

Fe: Olsen-EDTA

# Guías de fertilización de Mn para cultivos de flores

Mn suelo (mg/kg)	Mn a aplicar a la siembra (g/era)
<6	20
6-12	15
12-16	12
16-20	9
>20	0

Fuente: sulfato de Mn  
(pH < 6.0, bajo P)

Quelato de Mn  
(pH > 6.0, alto P)

Mn: Olsen-EDTA

# Guías de fertilización de Cu para cultivos de flores

Cu suelo (mg/kg)	Cu a aplicar a la siembra (g/era)
<3	15
3-6	9
6-9	4
>9	0

Fuente: sulfato de Cu  
(pH < 6.0, bajo P)

Quelato de Cu  
(pH > 6.0, alto P)

Cu: Olsen-EDTA

# Guías de fertilización de Zn para cultivos de flores

Zn suelo (mg/kg)	Zn a aplicar a la siembra (g/era)
<3	15
3-6	9
6-9	4
>9	0

Fuente: sulfato de Zn  
(pH < 6.0, bajo P)

Quelato de Zn  
(pH > 6.0, alto P)

## Guías de fertilización de B para cultivos de flores

B suelo (mg/kg)	B a aplicar a la siembra (g/era)	B fertilizante (2 veces/semana) (mg/L)
<1.0	5.6–11.0	0.7–1.0
1.0–1.5	4.5–5.6	0.5–0.7
1.5–2.0	2.8–4.5	0.3–0.5
>2.0	0.0	0.0–0.3
	Fuente: Borax, Borato	Fuente: solubor, klip B, etc.

B: método agua caliente, espectroscopia (azometina-H)

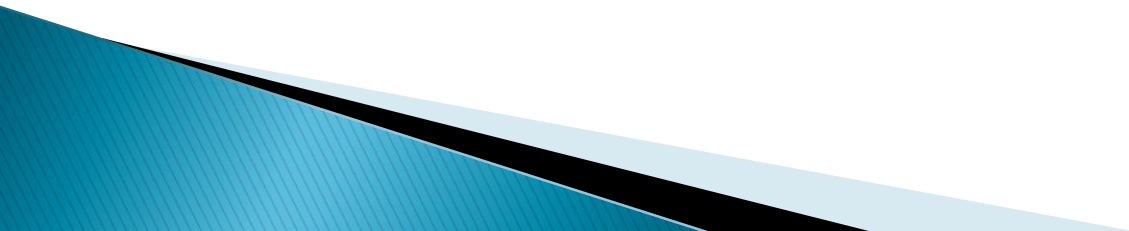
# Rangos adecuados de nutriente en tejidos foliares para el crisantemo

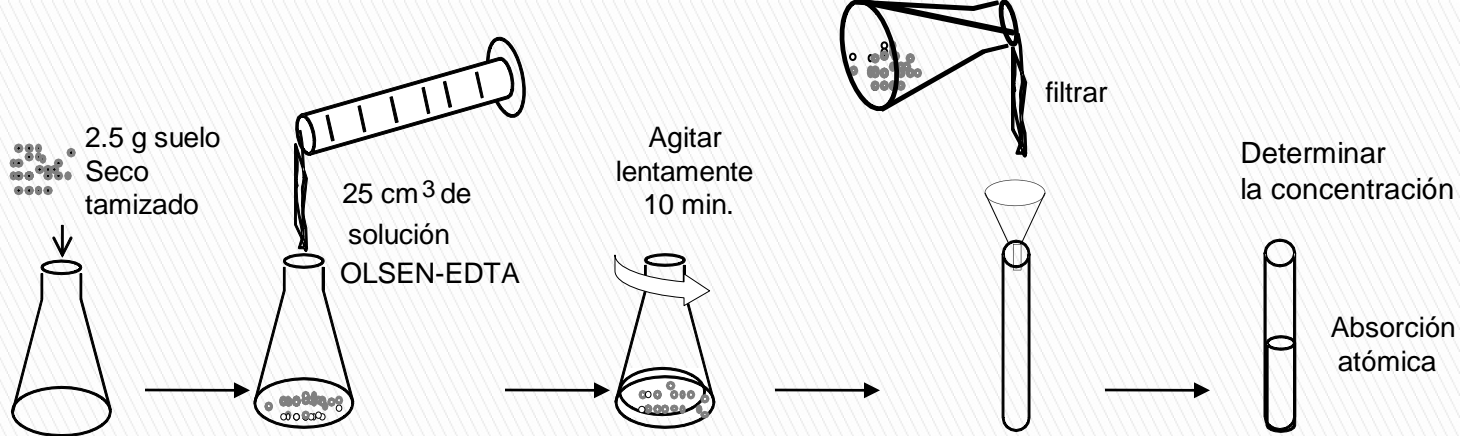
- ▶ 5<sup>a</sup> hoja de arriba hacia abajo (5<sup>o</sup> semana)



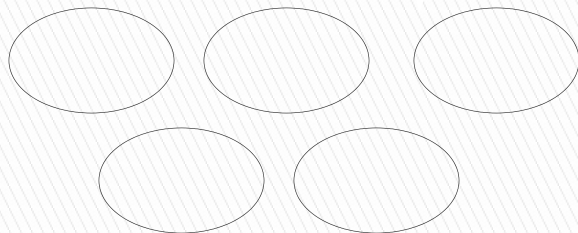
EM	Rango adecuado ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) (=ppm)	Deficiencia ( $\mu\text{g g}^{-1}$ )
Fe	100–500	< 40
Mn	80–300	< 30
Cu	8–20	< 5
Zn	20–80	< 7
B	30–70	< 20

# Imágenes adicionales

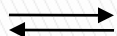
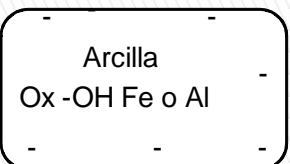




EDTA<sup>-</sup>

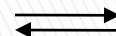


Fe<sup>2+</sup> Mn<sup>2+</sup>

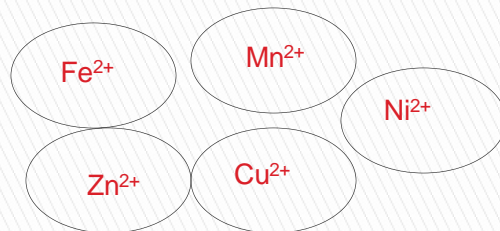


Fe<sup>2+</sup> Mn<sup>2+</sup>  
Zn<sup>2+</sup> Cu<sup>2+</sup>

Ni<sup>2+</sup>



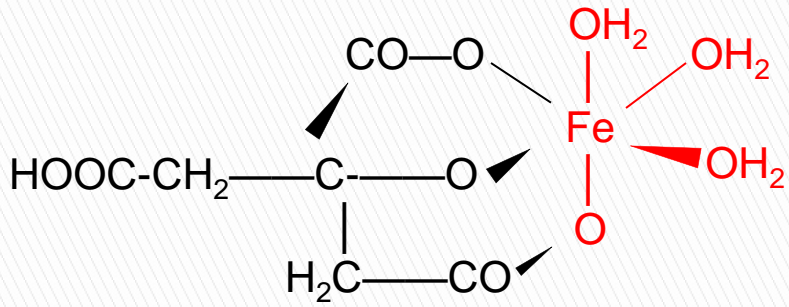
EDTA-X<sup>-</sup>



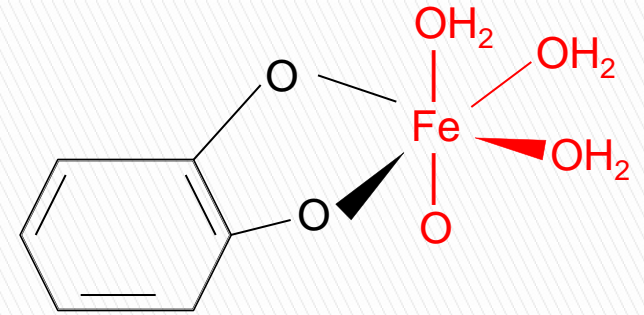
La concentración se determina por Absorción atómica y se expresa en mg kg<sup>-1</sup>



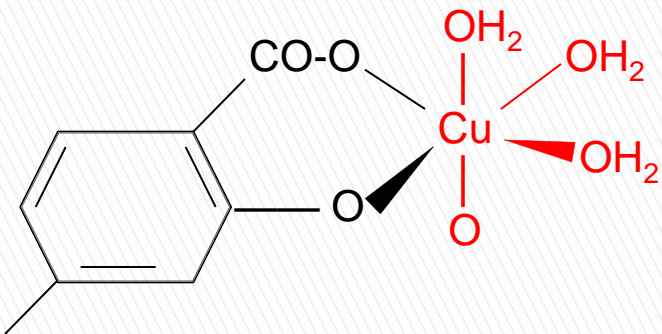




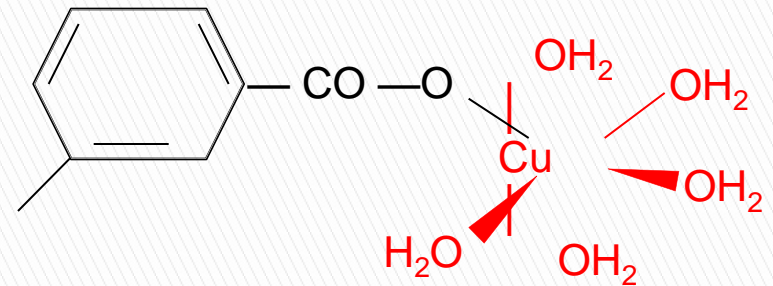
Citrato-Fe



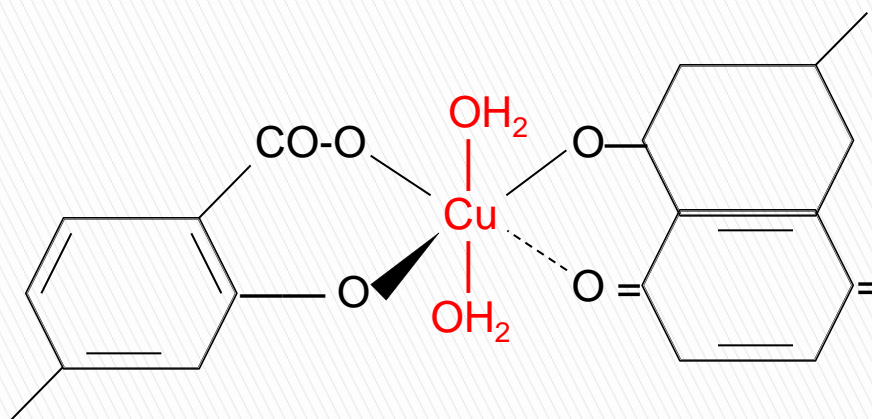
Catecolato-Fe



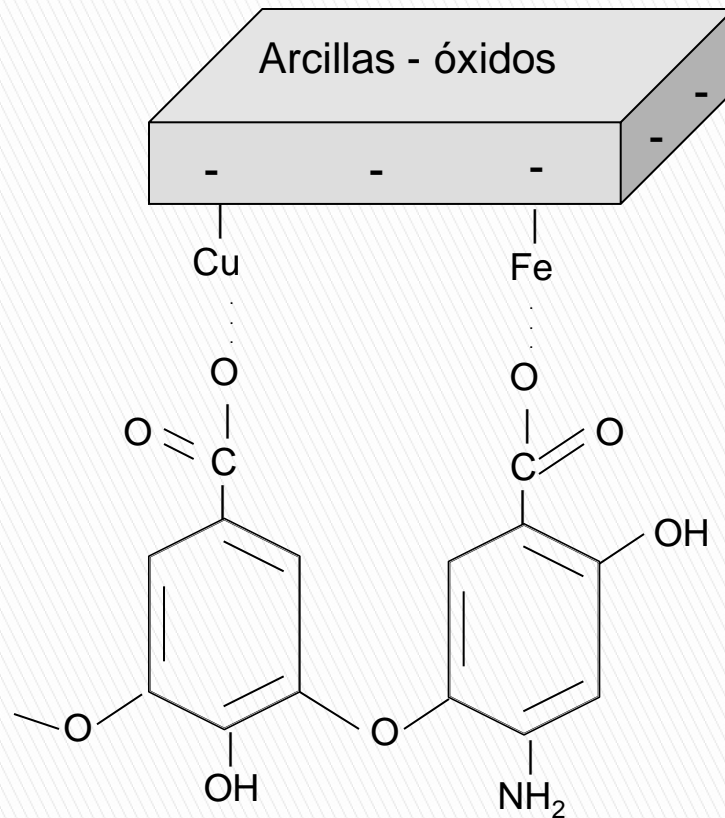
Anillo de quelato de Cu  
Grupo carboxílico-fenólico



Quelato de Cu  
Grupo carboxílico

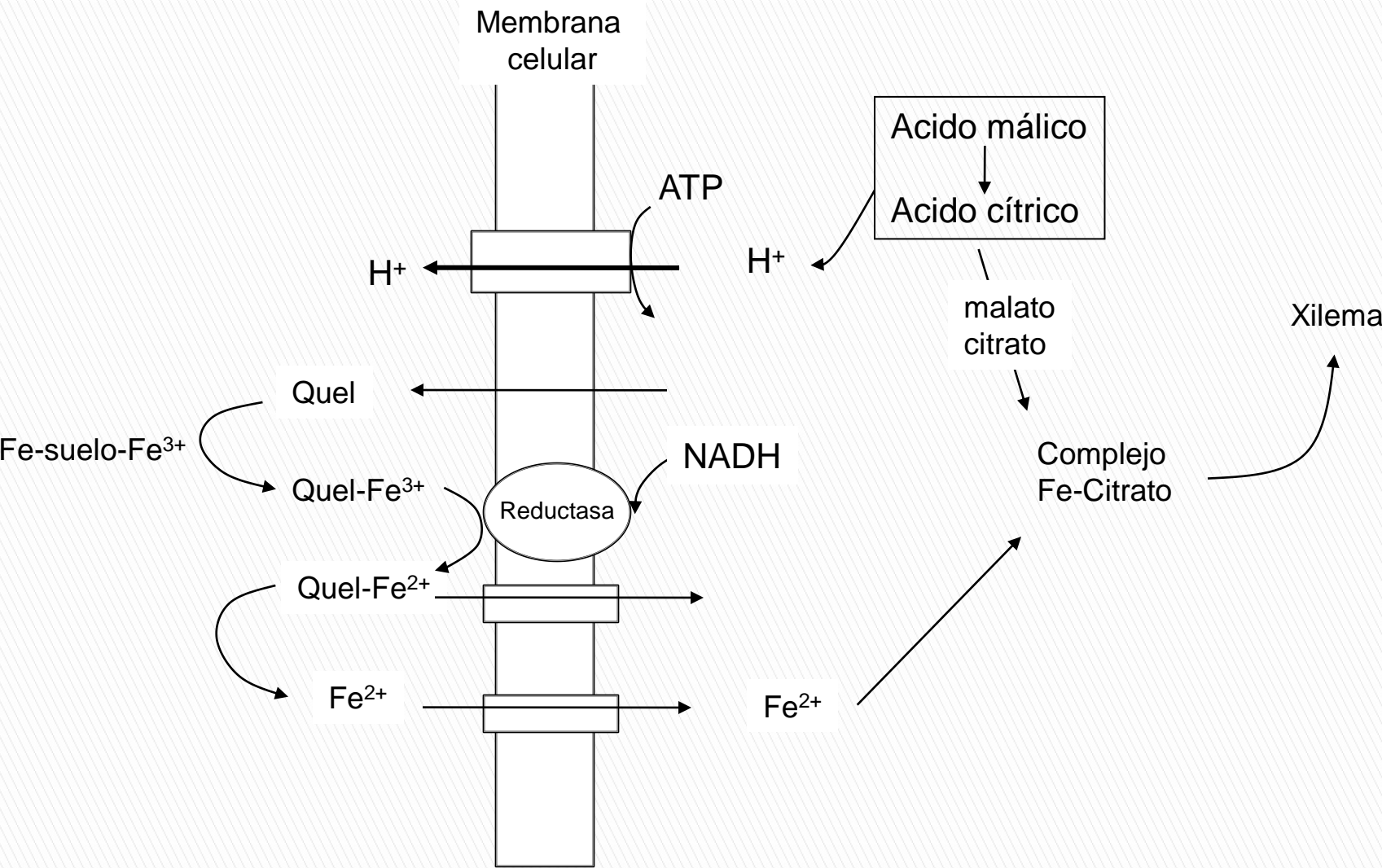


Cu complejo en estructuras  
de cadenas de compuestos orgánicos

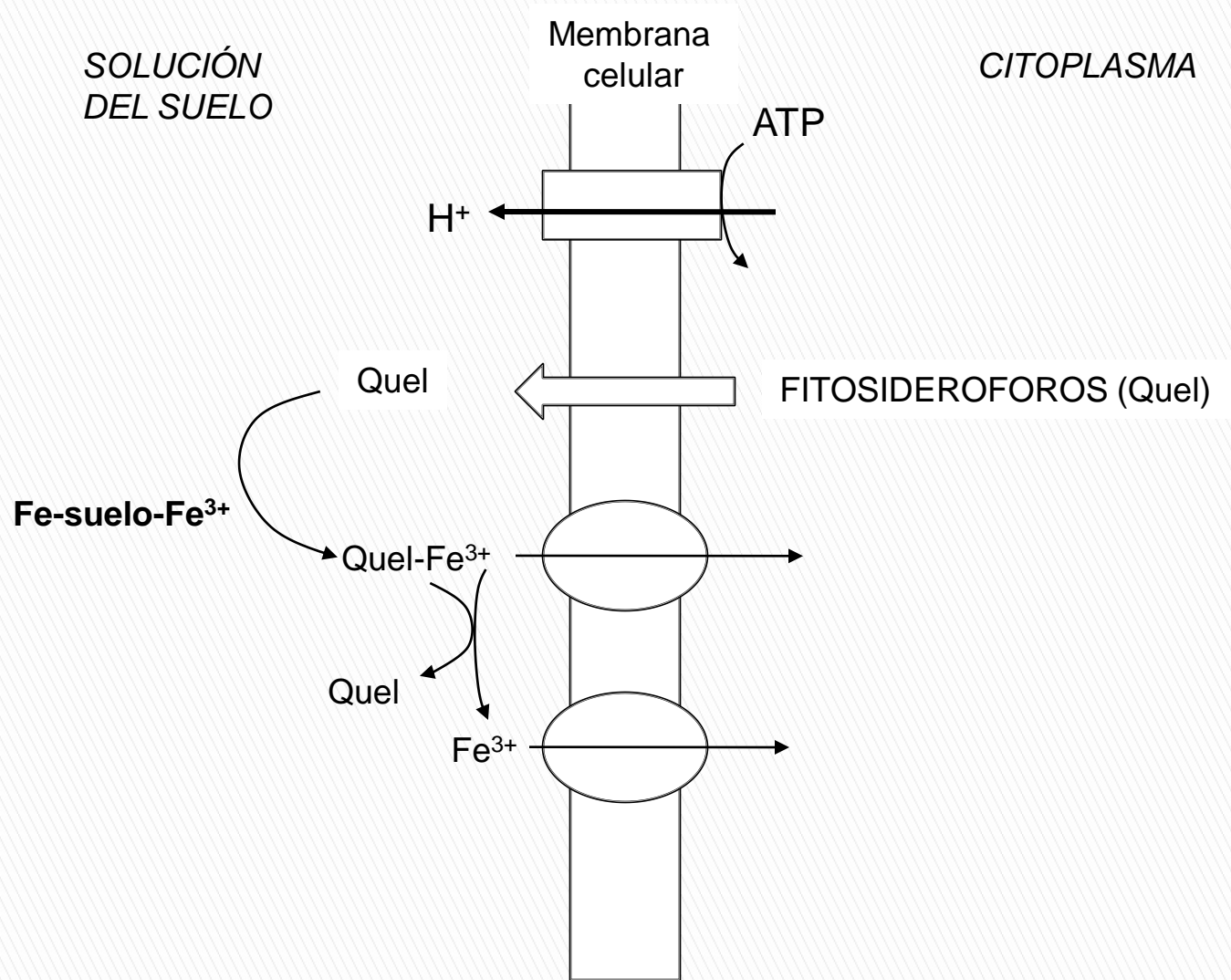


Compuestos orgánicos unidos a las superficies de arcillas y óxidos a través de metales polivalentes ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ )

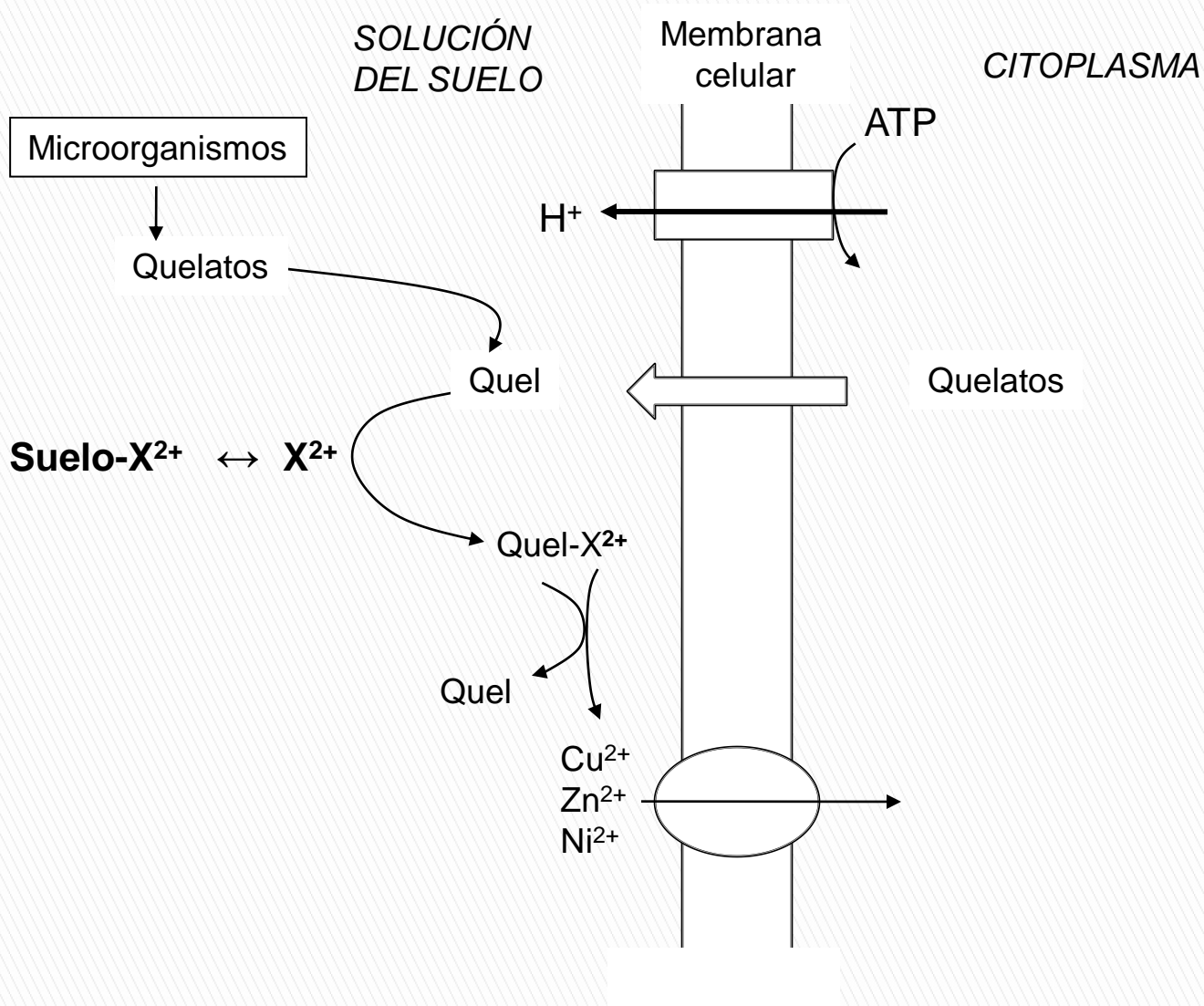
# QUELATACIÓN-REDUCCIÓN EN DICOT

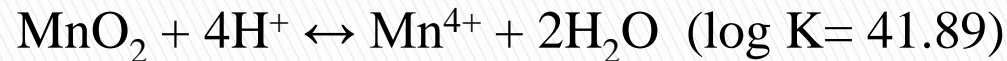
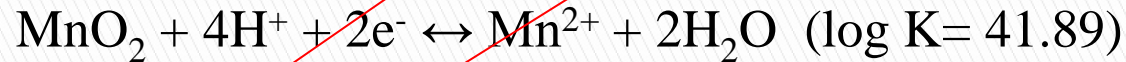
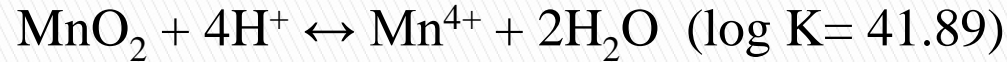
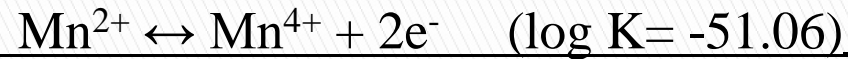
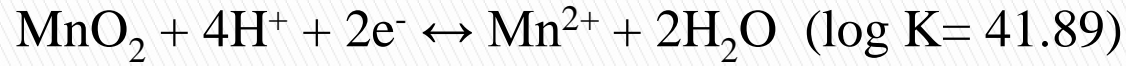


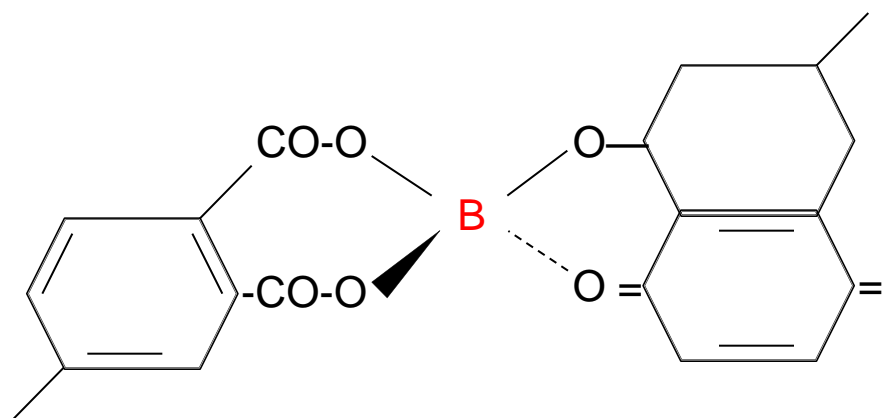
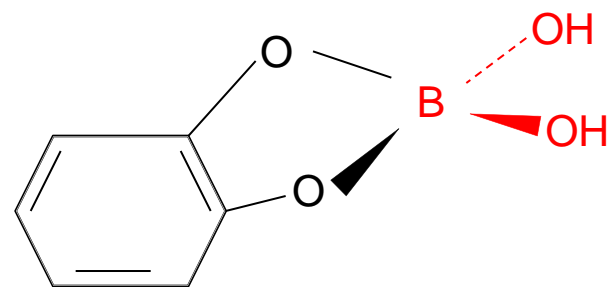
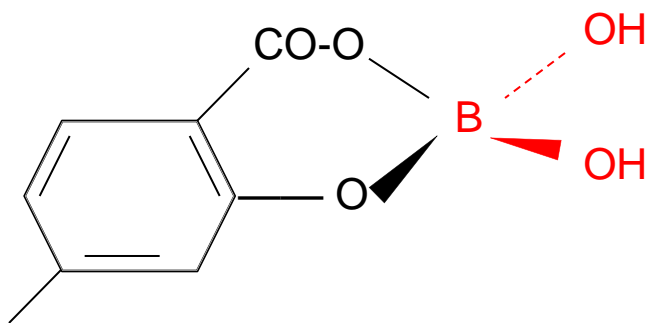
# QUELATACIÓN POR FITOSIDEROFOROS MONOCOT-POACEAS

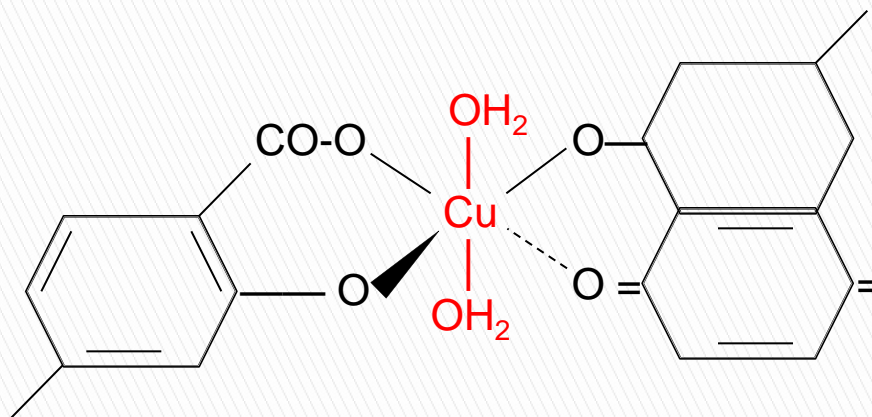


# ABSORCIÓN DE Cu, Zn, Ni

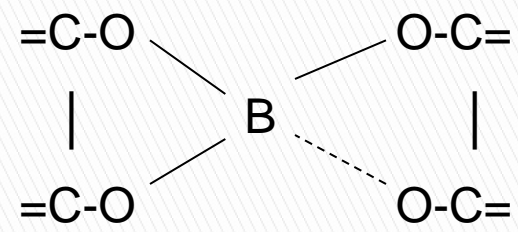
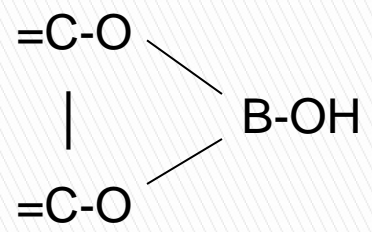


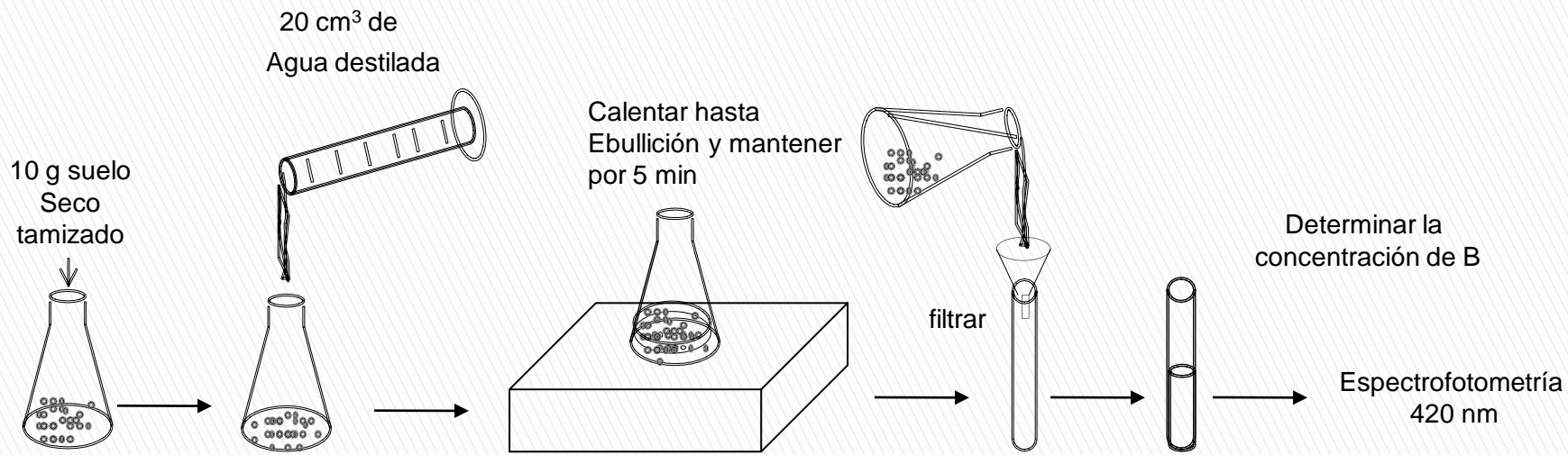


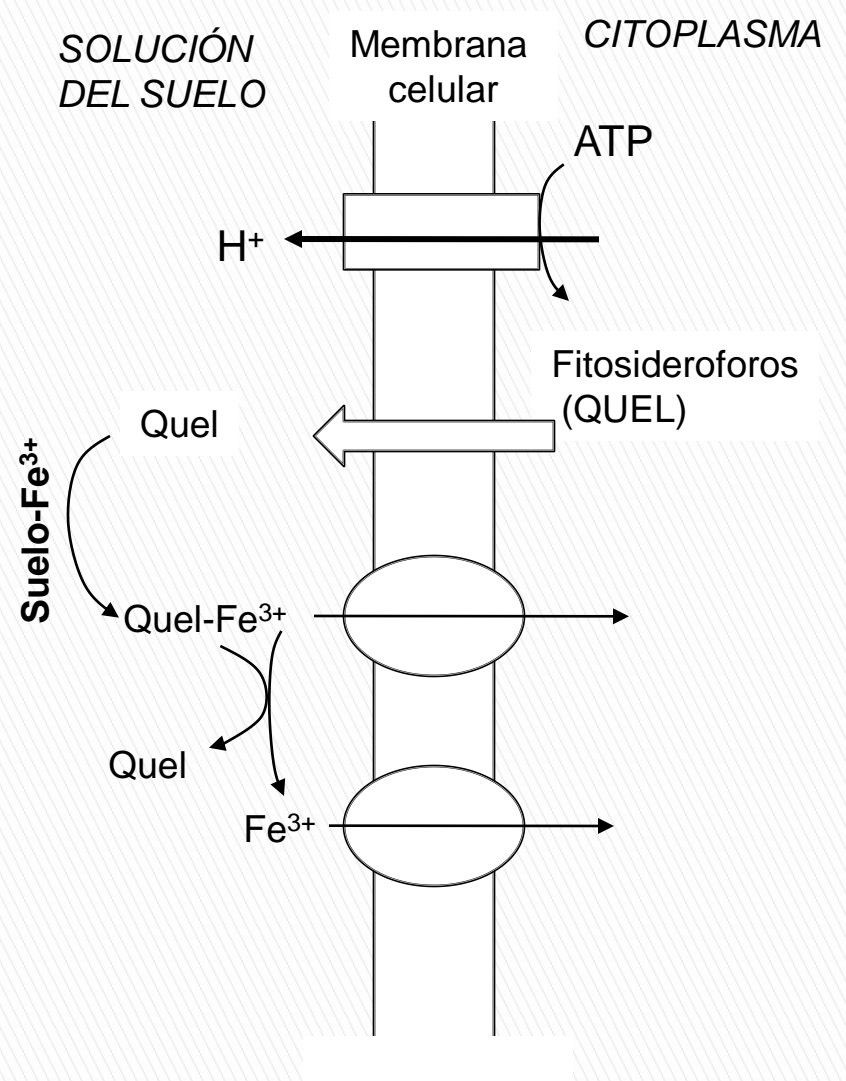
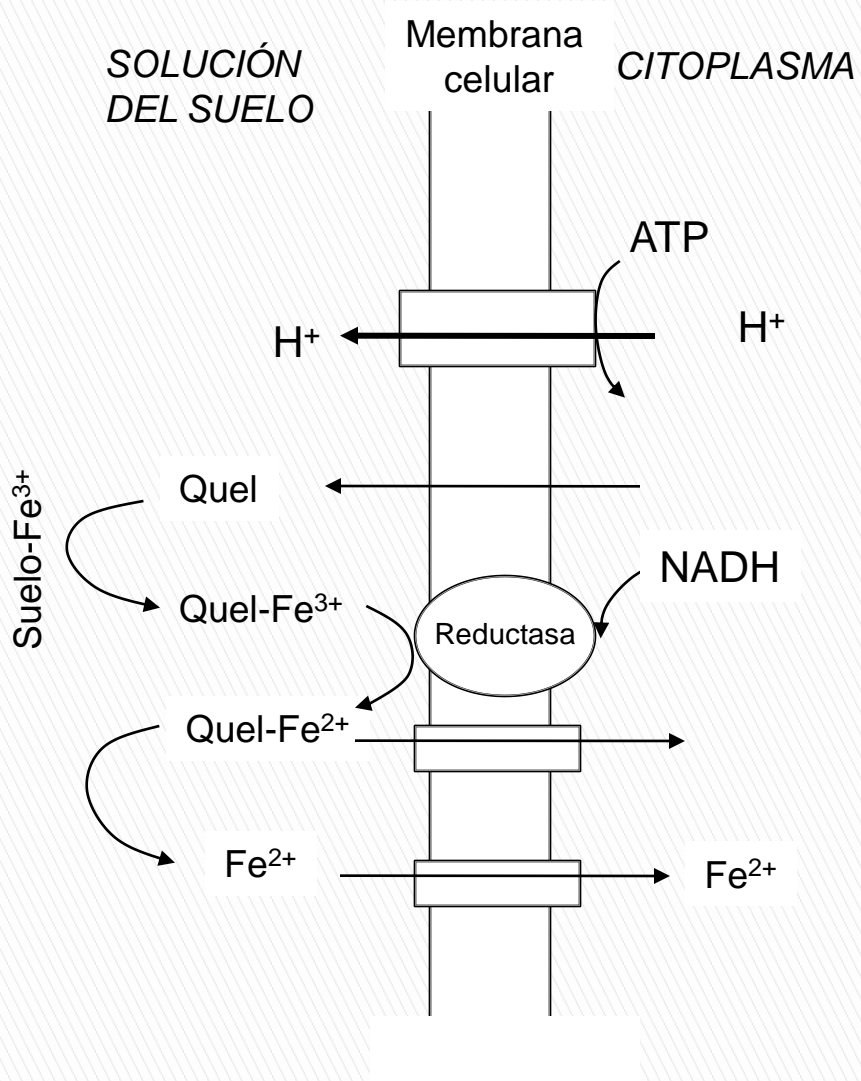




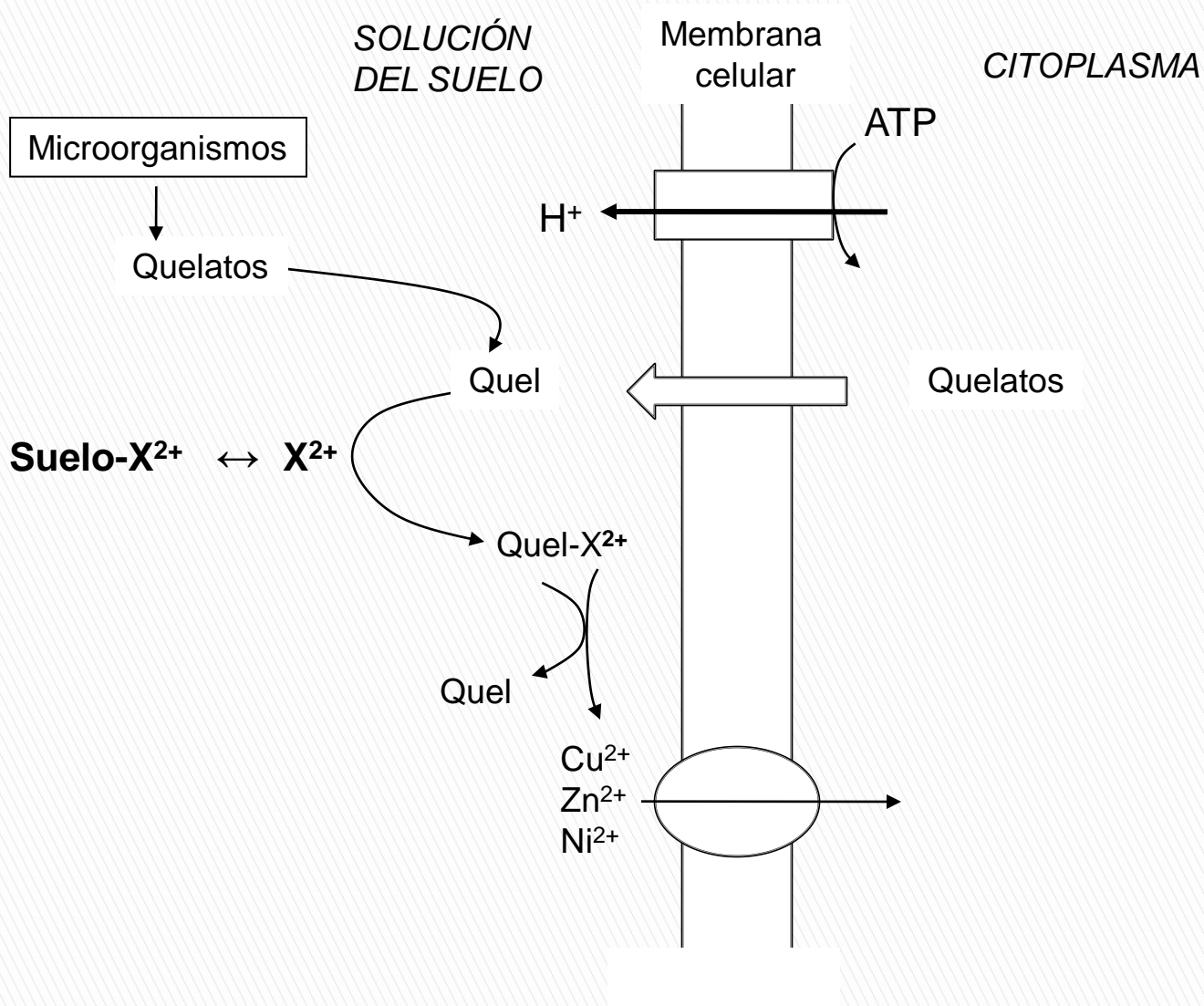
Cu complejo en estructuras  
de cadenas de compuestos orgánicos

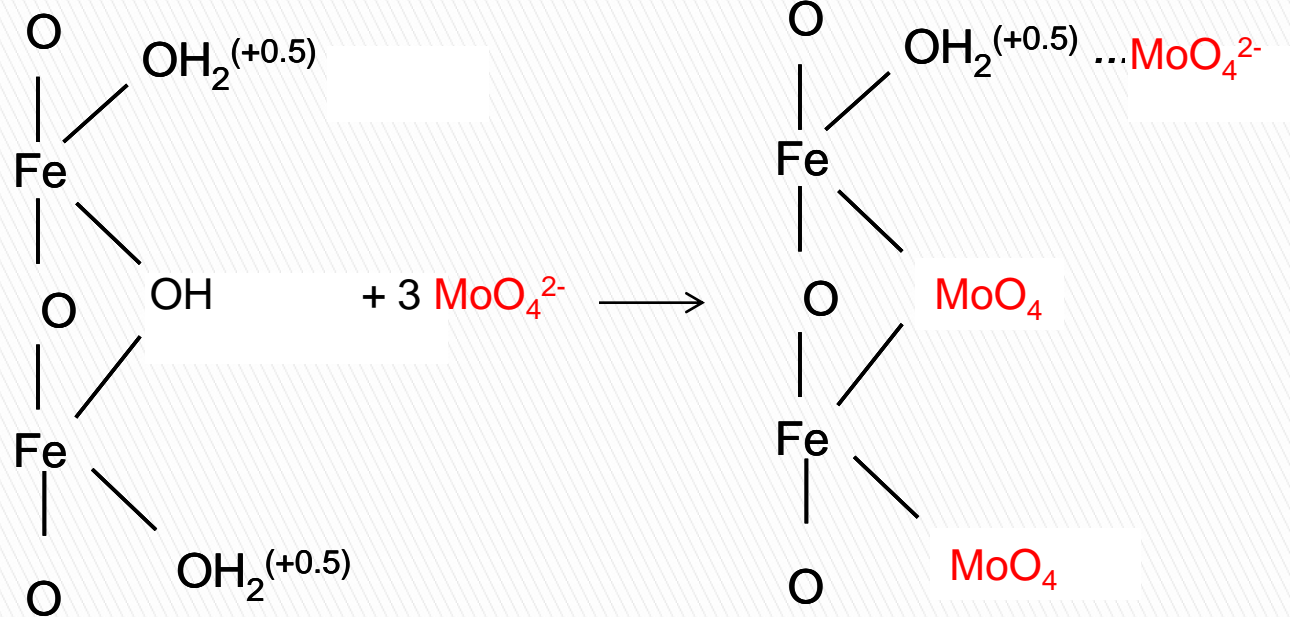


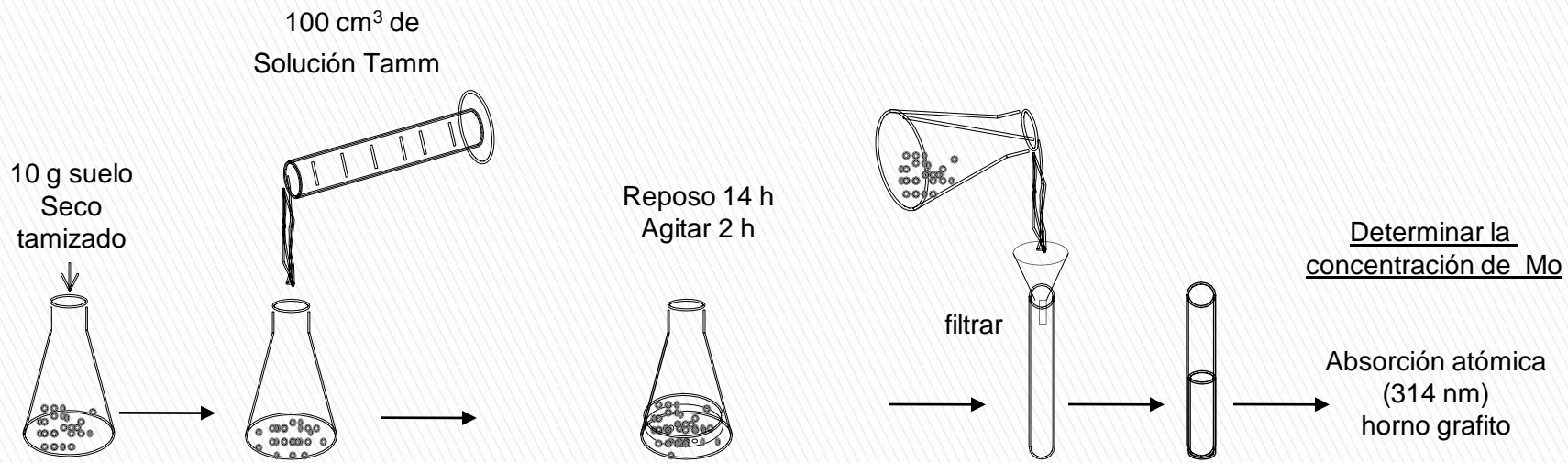




# ABSORCIÓN DE Cu, Zn, Ni







# Cloruro

