

QUÍMICA AGRÍCOLA

Antonio L. Alarcón Vera

Dpto. Ciencia y Tecnología Agraria.

Área Edafología y Química Agrícola.

Antonio.Alarcon@upct.es

I. HISTORIA DE LA NUTRICIÓN VEGETAL

Antecedentes e inicios de la Química Agrícola

- De semilla a planta: Interés desde siempre

Época antigua

- Época griega.
- Época romana: Petrus Crescentius recopila y resume hacia 1240 toda la información disponible, en un libro titulado "*Opus Ruralium Commodorum*", texto de partida para el gran número de libros sobre agricultura que aparecen en Europa durante los siglos XVI y XVII.
- Interés científico además de práctico.

Antecedentes e inicios de la Química Agrícola

Siglo XVII (búsqueda del “principio” de la vegetación)

- Francis Bacon: El agua constituye el principal alimento de las plantas, mientras que el suelo las protegía del frío y el calor y proporcionaba una determinada sustancia a cada planta.
- Van Helmont: Experimento de 5 años con vástago de sauce (200 lb de suelo, plantó un vástago de sauce de 5 lb, a los 5 años el árbol pesaba 169 lb y 3 oz, mientras que el suelo solo perdió 56 g).
- Robert Boyle: Repitió el experimento con calabaza.
- Glauber: El “salitre” y no el agua es el “principio de la vegetación”.

Antecedentes e inicios de la Química Agrícola

Siglo XVII (búsqueda del “principio” de la vegetación)

- John Woodward: En 1692 publica un trabajo que supuso un gran avance en la experimentación agrícola. Cultivó menta en agua de distinta procedencia: agua de lluvia, agua de río, residual y residual añadiéndole mantillo de jardín.
- Jethro Tull: Sostenía que el verdadero alimento de las plantas eran las partículas más finas del suelo, que eran absorbidas directamente por las raíces para hacerlas pasar al sistema circulatorio de la planta.

Antecedentes e inicios de la Química Agrícola

Siglo XVIII

- Francis Home: En 1775, existen al menos 6 materias nutritivas para las plantas: aire, agua, tierra, sales, aceite y fuego. Su libro "Los principios de la Agricultura y la vegetación" constituye un gran avance ya que reconoce que la nutrición vegetal depende de varios factores e indica el método a seguir para estudiar el problema: cultivo en macetas y análisis de la planta.
- Wallerius: En 1761, en su libro "De Humo" realizó indicaciones sobre la formación del humus y alguna de sus propiedades. Young publicó un tratado llamado "Anales de Agricultura" en 46 volúmenes que fue muy apreciado en su época.

Antecedentes e inicios de la Química Agrícola

Siglo XVIII

- Joseph Priestly: Descubrimiento del oxígeno, punto de partida de otros muchos descubrimientos. Dijo que las plantas, al contrario que los animales, purificaban el aire, pero tras descubrir el oxígeno, no pudo demostrarlo al no considerar la necesidad de luz.
- Jan Ingen-Housz, en el libro de 1779 "Experimentos sobre vegetales", demostró que la luz solar era necesaria para la producción de oxígeno, que sólo las partes verdes pueden sintetizarlo y que los frutos y las plantas en la oscuridad respiraban como los animales, y por tanto, viciaban el aire.
- Jean Senebier obtuvo simultáneamente las mismas conclusiones y además sugirió que el aumento de peso del tallo de sauce en el experimento de Van Helmont podía deberse al aire fijado.

Evolución y desarrollo de los temas de nutrición mineral. Siglo XIX

De Saussure

- En 1804 en su libro "Investigaciones químicas sobre la vegetación" demuestra que las plantas podían absorber CO_2 y desprender O_2 en presencia de luz, y que sin CO_2 las plantas morían.
- También dedujo que el suelo sólo aportaba una pequeña parte de los alimentos de la planta, utilizando el análisis de sus cenizas, descartó que las plantas generaran espontáneamente potasa e hizo importantes avances en la asimilación del N y las funciones de la raíz.
- Fue el 1º en manifestar que el humus posee más C y menos H que los residuos originarios.
- Además desarrolló el método experimental cuantitativo. Sin embargo no fue muy considerado en su época.

Evolución y desarrollo de los temas de nutrición mineral. Siglo XIX

De Saussure

- Aún Von Thaer (1810) y Davy (1813) sostenían que las plantas extraían el C y otros nutrientes del humus del suelo.

Liebig

- 1834, Boussingault demuestra que aire y agua son las fuentes de C, H y O.
- 1840, su comunicación "La Química y sus Aplicaciones en la Agricultura y la Fisiología" tuvo tal impacto que a partir de entonces todo el mundo admitió que el C de las plantas procedía del CO₂ del aire. Sus afirmaciones fueron:

Evolución y desarrollo de los temas de nutrición mineral. Siglo XIX

Liebig

- La mayor parte del C de las plantas procede de la atmósfera.
- El H y el O provienen del agua
- Los álcalis son necesarios para la neutralización de los ácidos orgánicos formados en las plantas.
- Los fosfatos son necesarios para la formación de las semillas.
- Las plantas absorben indiscriminadamente los materiales del suelo, pero elimina por las raíces lo no necesario.

- Fallos: Presencia prueba de esencialidad, N absorbido sólo como amonio.
- Fabricó el “abono patentado Liebig” que fue un fracaso.

Evolución y desarrollo de los temas de nutrición mineral. Siglo XIX

Liebig

- Desarrolló la Ley del Mínimo.



- Sus aciertos y sus fallos estimularon la investigación

Evolución y desarrollo de los temas de nutrición mineral. Siglo XIX

Rothamsted

- 1843 se crea por Lawes y Gilbert. Sus conclusiones:
 - Los cultivos requieren P y K, pero la composición de las cenizas no es una medida exacta de la cantidad necesitada.
 - Las no leguminosas requieren un aporte extra de N, siendo igual de válido el nitrato como el amonio.
 - La fertilidad del suelo se puede mantener mediante fertilizantes químicos artificiales.
 - El beneficio del barbecho se debe al aumento del N disponible.

Evolución y desarrollo de los temas de nutrición mineral. Siglo XIX

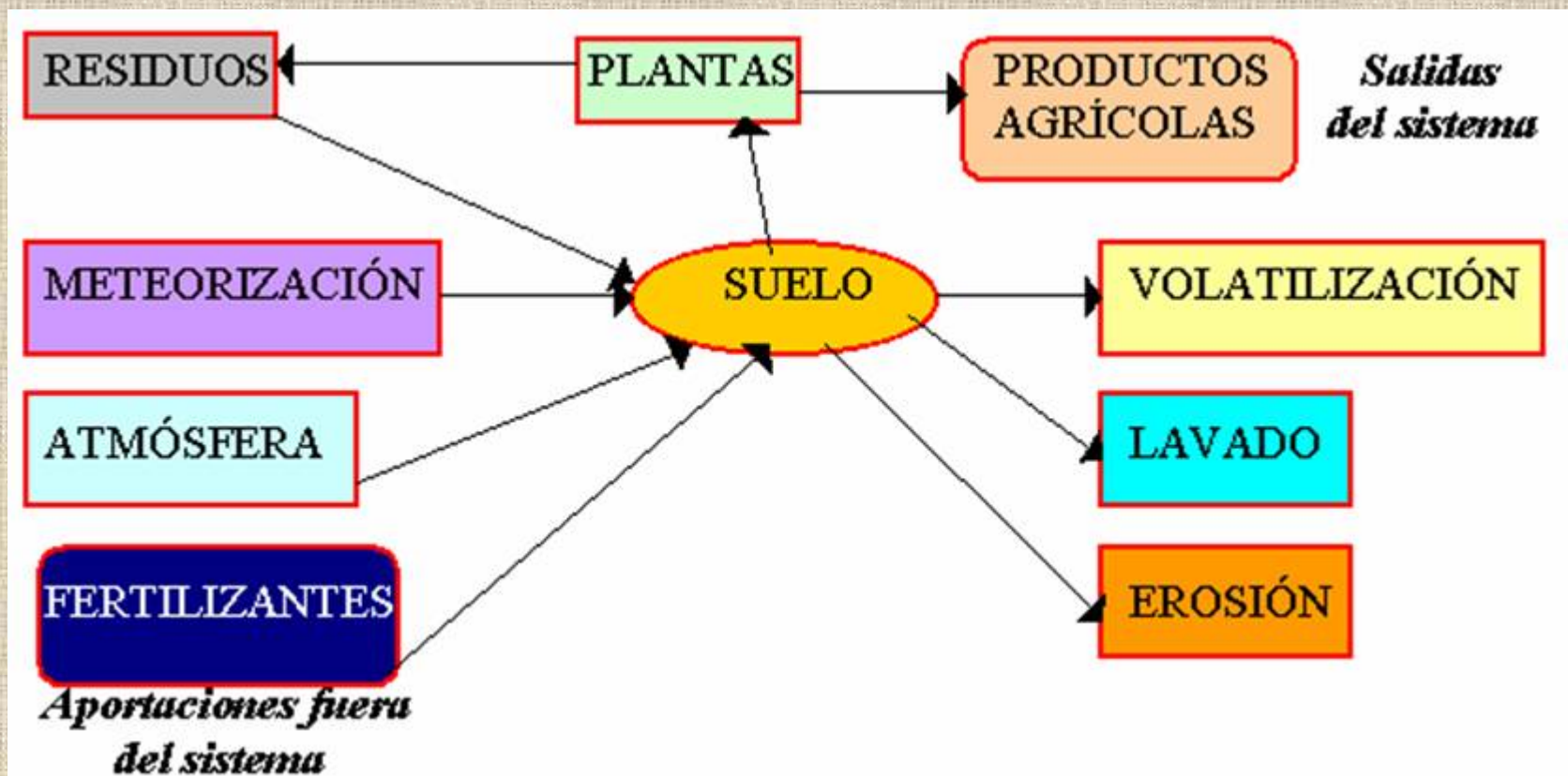
Otros

- 1856 Salm-Hortsmar, con SN demostró la esencialidad de P, S, K, Ca, Mg, Mg y Si.
- 1860 Sachs demuestra la esencialidad del Fe.
- Warrington pone de manifiesto la nitrificación.
- 1886, Hellriegel y Wilfarth, dicen que el N₂ atmosférico absorbido por leguminosas está condicionada por un factor independiente de suelo y planta y suponen acertadamente que son las bacterias contenidas en los nódulos de las raíces.
- Beijerinck aísla el "*Bacillus radicum*" actualmente género *Rhizobium*.
- A partir de ahí el número de descubrimientos es enorme...

II. INTRODUCCIÓN A LA NUTRICIÓN MINERAL. ELEMENTOS ESENCIALES

Fertilidad del suelo: Su capacidad de suministrar agua y nutrientes a las plantas

CICLO DE ELEMENTOS NUTRITIVOS EN EL SUELO



II. INTRODUCCIÓN A LA NUTRICIÓN MINERAL. ELEMENTOS ESENCIALES

Historia del mantenimiento de la fertilidad del suelo

- La agricultura nace hace en el 9000 a. C. aprox.
- El hombre se da cuenta que los suelos menguan su producción cuando son continuamente cultivados y se inician las prácticas de añadir despojos (historia de la mitología griega).
- Excrementos, abonado en verde, margas, salitre, cenizas, cadáveres...
- En sistemas cerrados es más o menos sostenible, después existe una inevitable pérdida de la fertilidad del suelo (Sicilia en la época del Imperio romano).
- La introducción por parte de Liebig de los fertilizantes químicos permite este mantenimiento.
- Objetivo: Fertilización racional.

II. INTRODUCCIÓN A LA NUTRICIÓN MINERAL. ELEMENTOS ESENCIALES

PRIORIDADES EN LA LIMITACIÓN DE UN CULTIVO CON DETERMINADAS CARACTERÍSTICAS GENÉTICAS

- Climatología
- Sanidad
- Labores culturales
- Riego
- Nutrición
- Otros



II. INTRODUCCIÓN A LA NUTRICIÓN MINERAL. ELEMENTOS ESENCIALES

PRIORIDADES EN AGRICULTURA INTENSIVA

Factores físicos, químicos y biológicos que afectan la fertilidad del suelo

Factores físicos

- Agricultura intensiva: Deterioro físico de los suelos
- Textura
- Estructura
- Porosidad, relación aire/agua

Factores químicos

- Nutrientes, formas, balances...

Factores biológicos

- MO fuente de energía y sustrato de microflora del suelo, procesos bioquímicos múltiples...Humificación, mineralización...

II. INTRODUCCIÓN A LA NUTRICIÓN MINERAL. ELEMENTOS ESENCIALES

Aspectos que interrelacionan estos factores

Absorción de nutrientes. Intensidad

- Función de los pelos absorbentes

Reacción del suelo

- pH que condiciona la asimilabilidad de los diferentes nutrientes

- Suelos arcillosos vs arenosos

Agua y aire

- Tamaño de poros, que están llenos de aire o agua

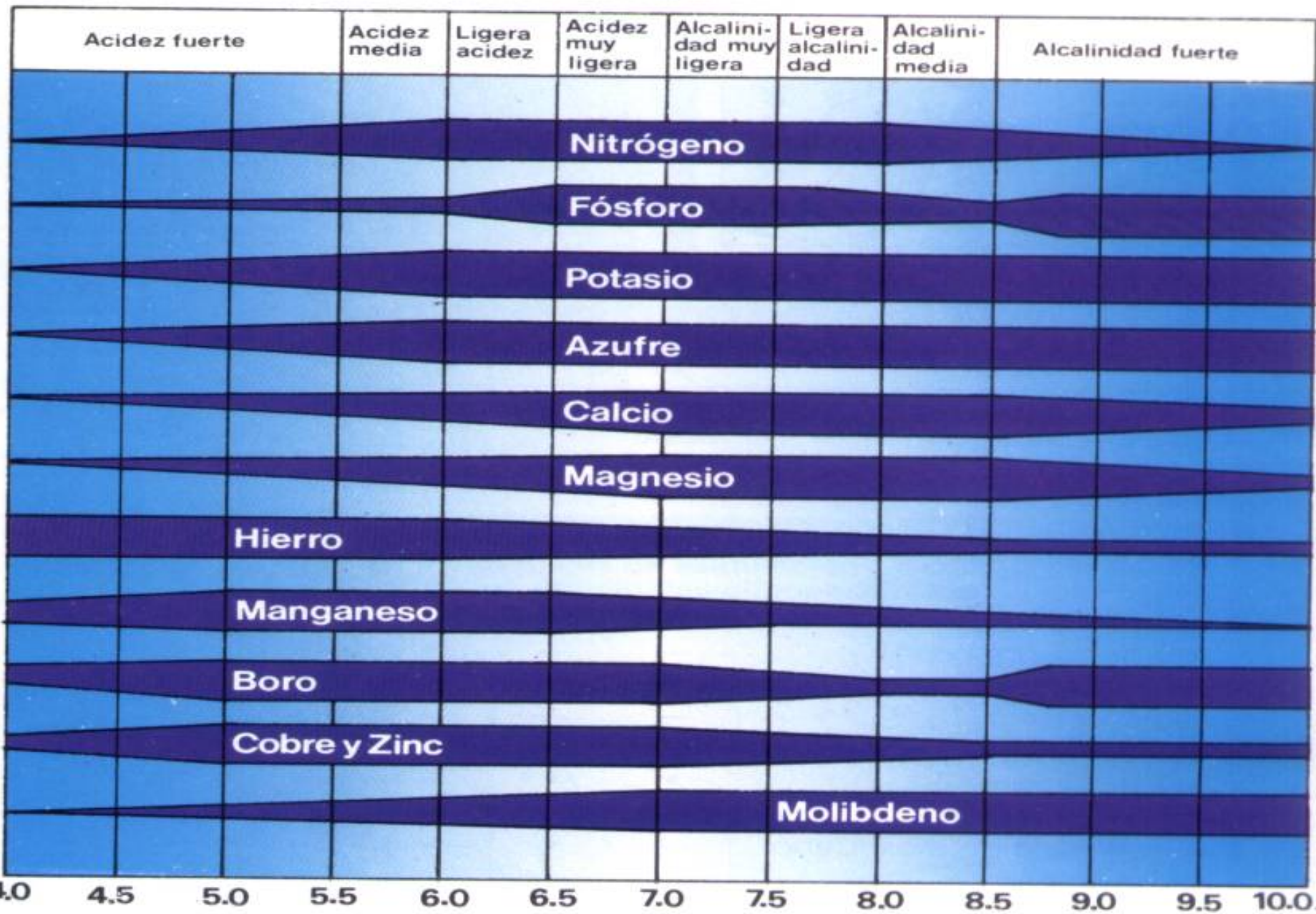
Importancia del correcto funcionamiento de la raíz

- Respiración, T^a, salinidad, estructura...

- Raíz activa, rizosfera, balance +/-, zonas activas de absorción,

Importancia en Ca, P, Fe, síntesis de sustancias (citoquininas)...

- Prioridades de la planta, curva de crecimiento de la raíz



LA PLANTA TIENE PRIORIDADES

PENSEMOS COMO PLANTAS:

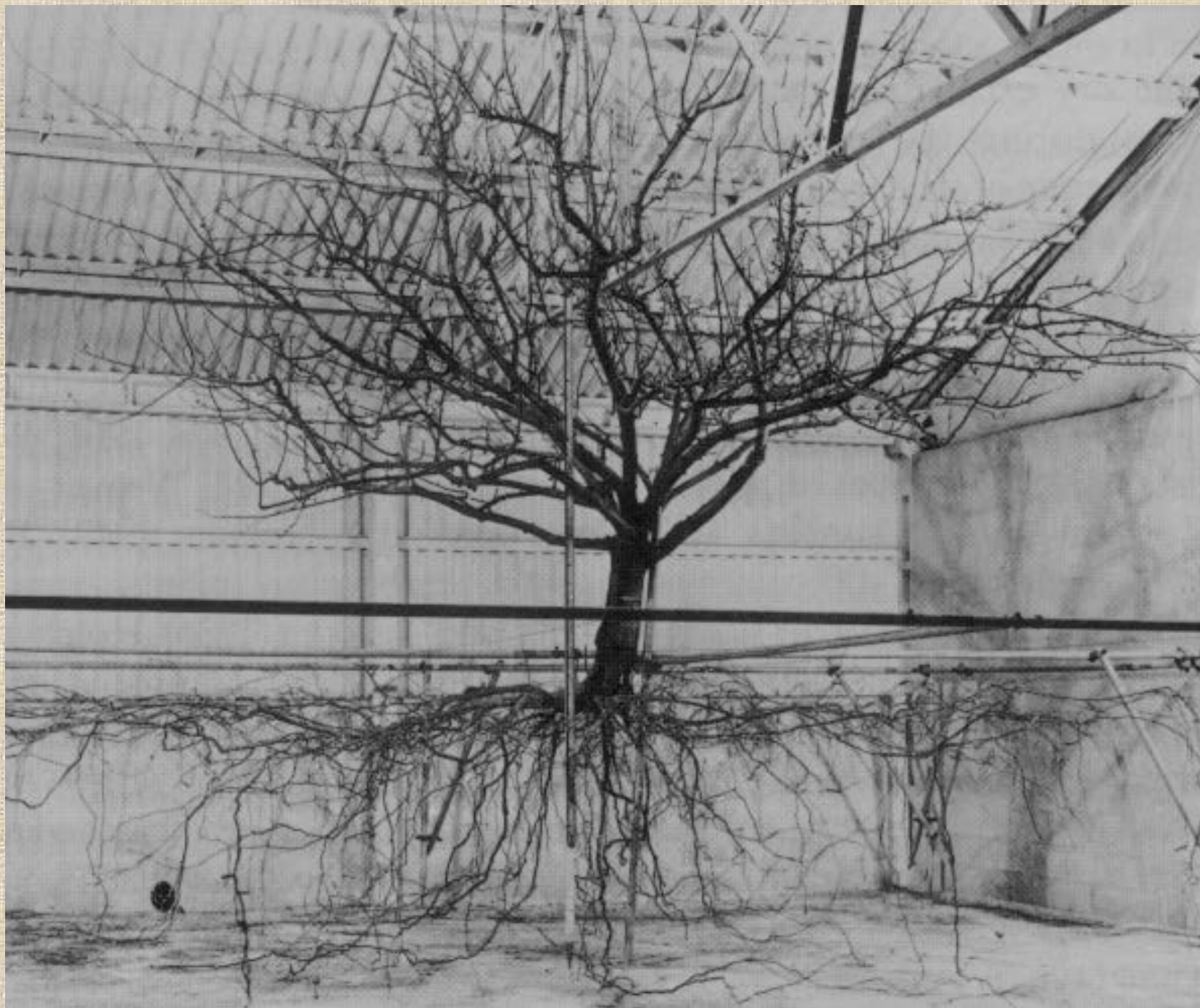
- SON SERES VIVOS CON INSTINTO DE SUPERVIVENCIA Y DE PERPETUAR LA ESPECIE

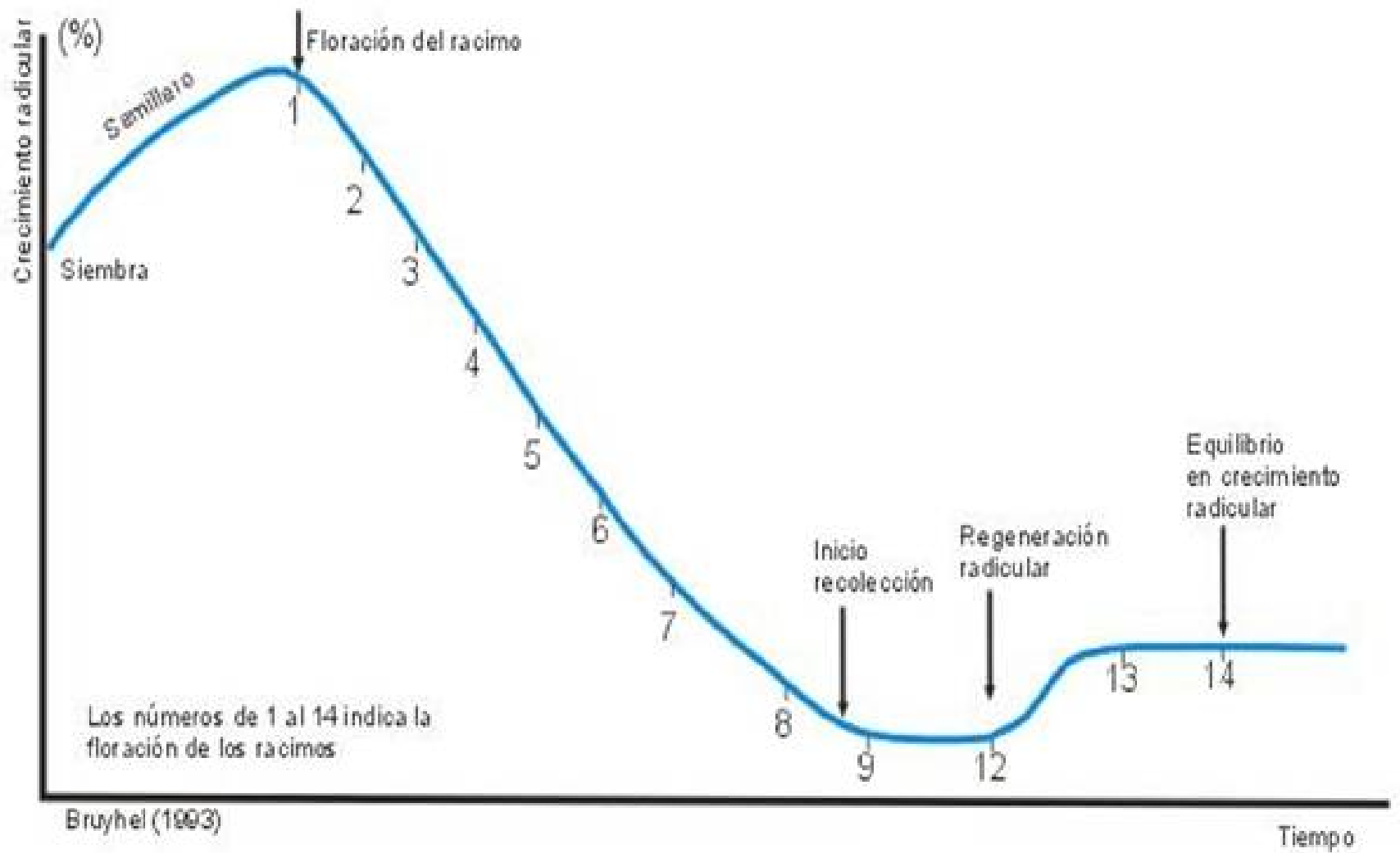
 - ENERGÍA Y FOTOSINTATOS SEGÚN PRIORIDADES
1. RAÍZ
 2. PARTE AÉREA
 3. FLORES
 4. FRUTOS CUAJADOS
 5. FRUTOS EN DESARROLLO
 6. FRUTOS EN MADURACIÓN



A close-up photograph of a plant's root system, showing several thick, light-colored roots extending from the soil. The roots are covered in a dense network of fine, fibrous root hairs. A green rectangular text box with a white border is superimposed over the center of the image.

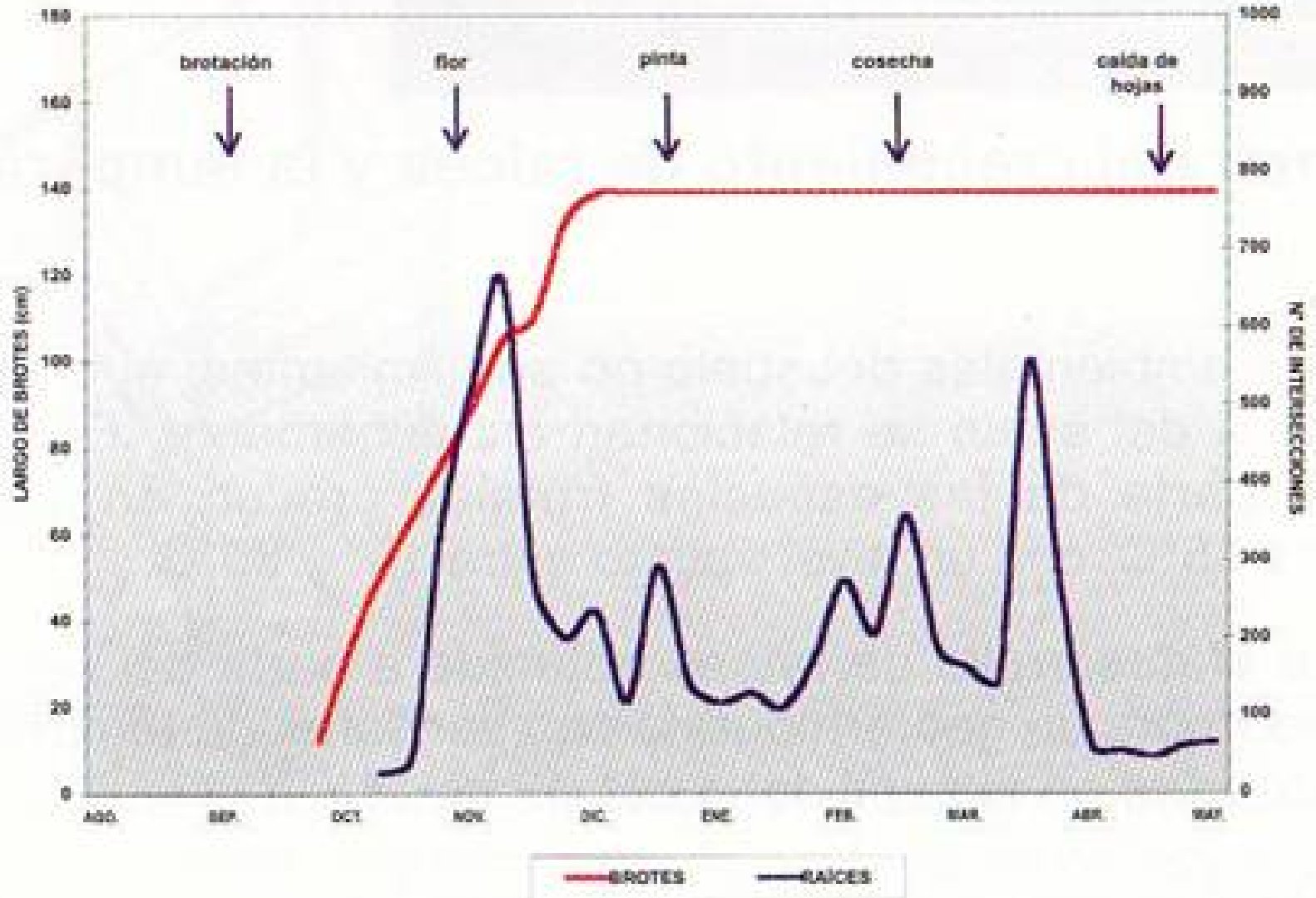
Debemos ser unos excelentes productores de raíces



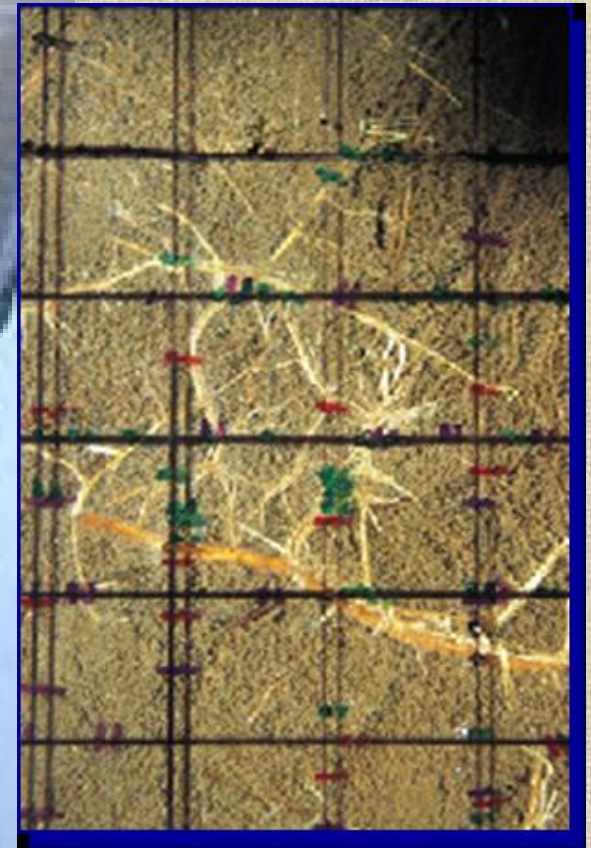


UN AGRICULTOR CON ÉXITO ES UN EXCELENTE PRODUCTOR DE RAÍCES

Curva típica del desarrollo de la raíz: ejemplo Uva



**UN AGRICULTOR CON ÉXITO
ES UN EXCELENTE PRODUCTOR DE RAÍCES**



II. INTRODUCCIÓN A LA NUTRICIÓN MINERAL. ELEMENTOS ESENCIALES

Los elementos químicos y la vida vegetal

- 94.0 - 99.5 % : C, H y O
- Fracción mineral: 0.5 - 6.0 % sms, que no es constante
- Factores limitantes
- Descubrimiento elementos esenciales: No posible analizando suelo y planta. Empleo de SN

Nutriente	Esencialidad
C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S y Fe	Sachs y Knop, 1860
Mn	McHarge, 1922
B	Warington, 1923
Zn	Sommer y Lipman, 1926
Cu	Lipman y McKinney, 1932
Mo	Arnon y Stout, 1939
Cl	Broyer y col., 1954
Ni	Brown y col., 1987

- Criterios de esencialidad (Arnon y Stout, 1939):

- Un elemento no puede considerarse esencial, a menos que su deficiencia imposibilite a la planta completar las etapas vegetativas y/o reproductivas de su ciclo.
- La deficiencia ha de ser específica del elemento en cuestión, y sólo se puede corregir con el suministro de éste.
- El elemento ha de estar directamente implicado en el metabolismo de la planta, con independencia de sus efectos en la corrección de condiciones desfavorables (químicas o microbiológicas) del medio externo.

Consideraciones del criterio 2: Mo vs V, Cl vs Br.

Caso del Na.

- Macro y micronutrientes esenciales (17)

Macroelementos (>0,1%):

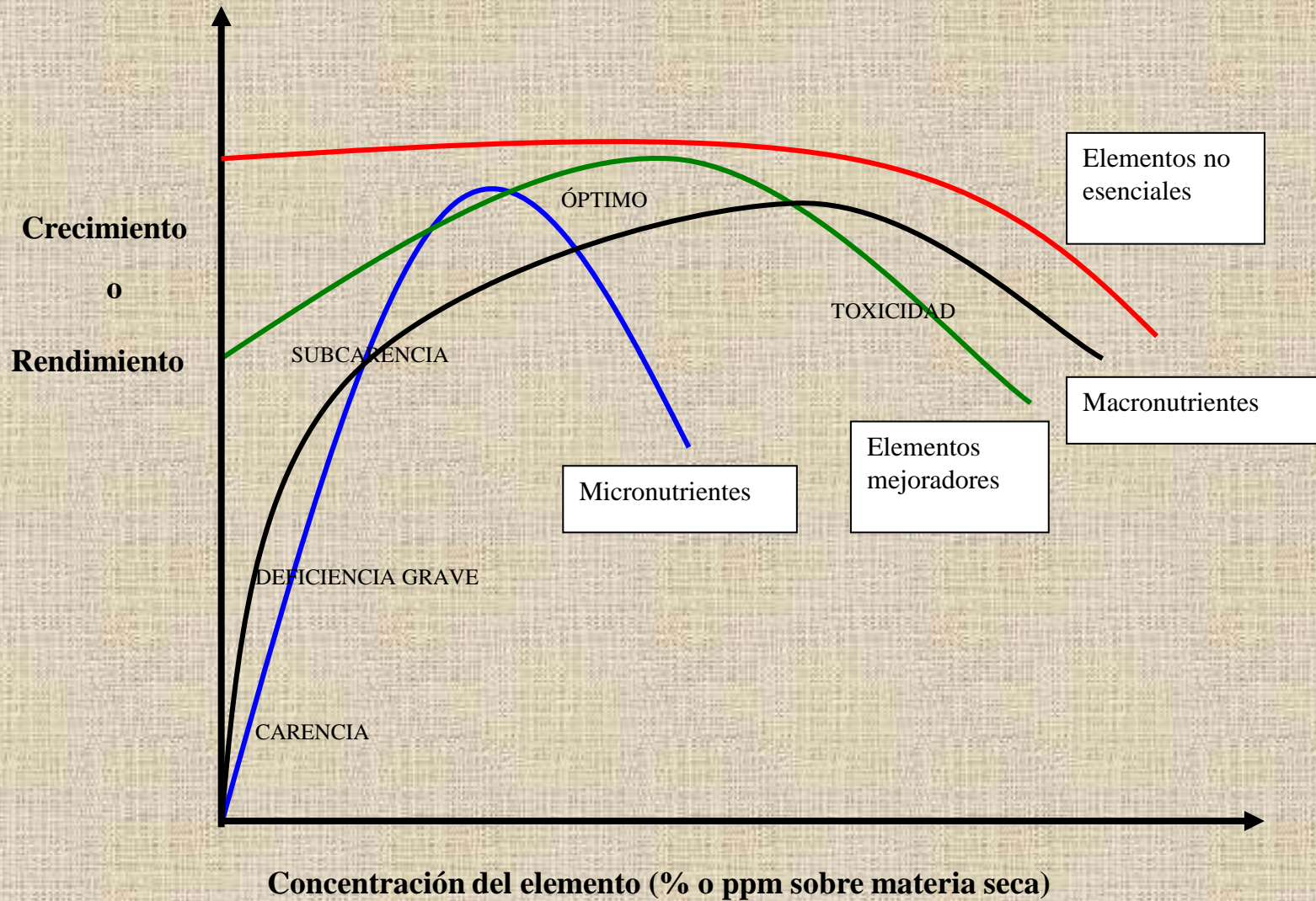
- Estructurales: C, H, O
- Principales: N, P, K
- Secundarios: Ca, Mg, S

Microelementos (<100 ppm): Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl, Ni

Elementos esenciales para algunas plantas: Na, Co, Si, V

- Elementos beneficiosos: Rb, Sr, Al, Ba, Ti... Por:
 - Estimular absorción o transporte de elementos esenciales, limitar la absorción de elementos tóxicos o en exceso, suplir parcialmente la falta de un elemento esencial
- Elementos esenciales para animales (15 de los 17) más Na, I, Se, Co
- Elementos no esenciales contenidos en las plantas (Al, Si, Se, otros)

- Curva del estado nutricional
- Óptimos fisiológicos y económicos



ORIGEN, FORMAS Y CONTENIDOS DE LOS ELEMENTOS ESENCIALES

- Nutrientes no disponibles: 98% (caso del N)
- Nutrientes adsorbidos: 2%
- Nutrientes en la disolución del suelo: 0,2%

Elemento esencial	Formas químicas asimilables	Contenidos medios
Carbono	CO₂	45 %
Hidrógeno	H₂O	6 %
Oxígeno	H₂O y O₂	45 %
Nitrógeno	NH₄⁺ y NO₃⁻	1,5 %
Fósforo	H₂PO₄⁻ y HPO₄⁻²	0,2 %
Potasio	K⁺	1,0 %
Calcio	Ca⁺²	0,5 %
Magnesio	Mg⁺²	0,2 %
Azufre	SO₄⁻²	0,1 %
Hierro	Fe⁺² y Fe⁺³	100 ppm
Manganeso	Mn⁺²	50 ppm
Boro	H₃BO₃	20 ppm
Cinc	Zn⁺²	20 ppm
Cobre	Cu⁺² y Cu⁺	6 ppm
Cloro	Cl⁻	100 ppm
Molibdeno	MoO₄⁻²	0,1 ppm
Níquel	Ni⁺²	0,1 ppm

ABSORCIÓN MINERAL

- Selectividad de las raíces
- Pelos absorbentes
- Elemento en estado asimilable vs estado de inasimilabilidad
- Cantidades de absorción de diferentes elementos
- Mecanismos de absorción mineral
 - Interceptación por las raíces (importancia en sustratos)
 - Flujo de masas
 - Difusión

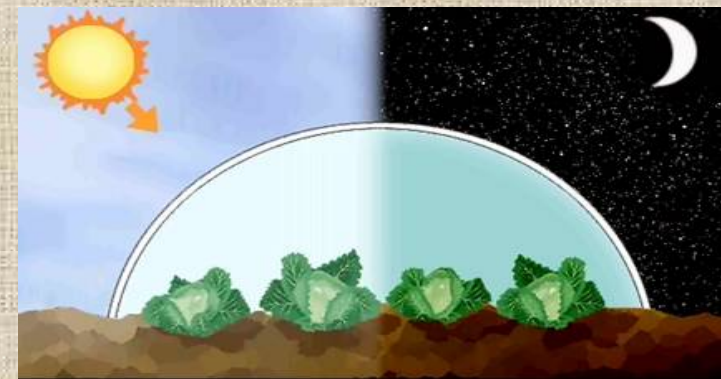
ABSORCIÓN MINERAL

Nutriente	Interceptación por las raíces	Flujo de masas	Difusión
% Nitrógeno	2	98	-
% Fósforo	3	6	91
% Potasio	2	20	78
% Calcio	28	72	-
% Magnesio	13	87	-
% Azufre	5	95	-
% Boro	3	65	32
% Cobre	70	20	10
% Hierro	50	10	40
% Manganeso	15	5	80
% Molibdeno	5	95	-
% Cinc	30	30	40

- Teorías del proceso de absorción de nutrientes:
 - Teoría del intercambio por contacto
 - Teoría del intercambio del ácido carbónico

FACTORES INFLUYENTES EN LA ABSORCIÓN MINERAL

- Relacionados con el suelo
 - Textura (arcilloso vs arenoso)
 - Nivel de oxígeno (> 10%)
 - pH (precipitación, volatilización del amonio)
 - Interacciones iónicas (antagonismos, sinergismos, complejo equilibrado)
- Relacionados con la planta
 - Naturaleza de la planta
 - Estado fenológico
- Relacionados con las condiciones climáticas
 - Temperatura
 - Humedad
 - Luz



NITRÓGENO

Esencialidad

- Para todos los seres vivos, componente de proteínas y de múltiples compuestos orgánicos.
- Volátil por calcinación, problema en cenizas.
- Demostración definitiva: Lawes y Gilbert (1847).
- Limitante más común del crecimiento de las plantas

Origen

- Suelo, si exceptuamos fijadores de N_2 y NH_3 gaseoso
- Fertilizantes y MO

NITRÓGENO en planta

Contenidos en planta

- 2% sms. Mayores contenidos en tejidos jóvenes (5,5-6,5%). A mayor edad, mayor contenido en celulosa (mayor C/N). Hojas más N que otros órganos y leguminosas más N que otras plantas.

Formas en planta

- Fundamentalmente orgánica (proteínas y otros).
- En hojas 20-40% de N soluble como Aa fundamentalmente.
- También formas inorgánicas (Nitratos, nitritos, amonio).

Absorción

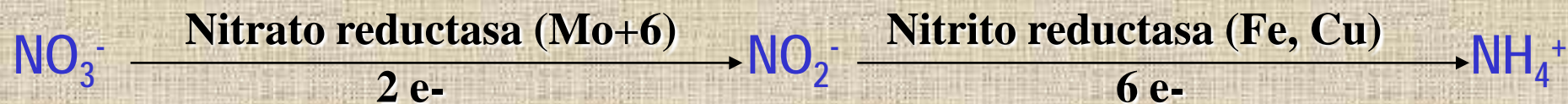
- NO_3^- y NH_4^+ . Influye edad de planta, especie, pH del suelo y composición.
- Antagonismos de forma amónica

NITRÓGENO en planta

Integración en la planta

• Reducción del nitrato: Precisa E y esqueletos carbonados. Se da tanto en raíces como en hojas, si el suministro de nitratos es bajo se da preferentemente en raíces (sobre todo en leñosas, con $\text{NO}_3^- < 10$ ppm), en herbáceas gran parte se reduce en hojas (donde se pueden alcanzar contenidos superiores a 1000 ppm).

Dos etapas:



Asimilación y toxicidad de la forma amónica

NITRÓGENO en planta

Integración en la planta

- Biosíntesis de Aa: Generalmente los Aa son los primeros compuestos orgánicos que aparecen durante la asimilación del N. Mayormente mediante aminación reductora (formación de Ác. Glutámico a partir de Ác. A-ceto glutárico) y posterior transaminación para sintetizar el resto de Aa.

Funciones del N en la planta

- Constituyente de gran número de compuestos orgánicos esenciales.
- Forma parte de proteínas, purinas, pirimidinas, ácidos nucleicos (ARN, ADN), clorofila, enzimas (citocromos), coenzimas, NAD, NADP, hormonas, alcaloides, glucósidos, fosfátidos, etc. La mitad del N de las hojas forma parte de la Rubisco.
- Niveles altos de N estimulan la división celular de meristemos y retrasan la senescencia (se estimula la síntesis de citoquininas). Niveles bajos estimula la síntesis de ABA que acelera la senescencia.

NITRÓGENO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia: Vegetación raquítica, hojas pequeñas, rígidas y color verde amarillento. Pecíolos acortados y nervios más pronunciados. Floración escasa.

Maduración acelerada del fruto, rendimiento bajo, acumulación de P.

Elemento móvil: Deficiencia inicia en hojas adultas.





Deficiencias en maíz



Deficiencia en tabaco

Deficiencia en patata



NITRÓGENO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Exceso: Signos contrarios, plantas muy suculentas, poco lignificadas, escaso desarrollo de raíces.

Hojas de color verde oscuro. Maduración retrasada (relación N/K).

Calidad del fruto mermada

Favorece deficiencia de Cu y otros micros, Mg. Ocasiona mayor sensibilidad a enfermedades, y condiciones adversas (sequía, heladas).



Exceso de nitrógeno en tomate (maduración dispareja)



Exceso de nitrógeno (toxicidad por amonio) en pepino

NITRÓGENO en suelo

Origen

- No proviene de la degradación de la roca madre, deriva en última instancia del N_2 atmosférico fijado por descargas eléctricas o fijaciones biológicas.
- La mayor parte está integrando la MO del suelo o en suelos de cultivo por adición de fertilizantes.

Valor de Nitrógeno total	Valor de Nitrógeno mineral	Nivel
< 0.05 %	< 10 ppm	Muy bajo
0.05 – 0.10 %	11-20 ppm	Bajo
0.10 – 0.20 %	21-40 ppm	Normal - Medio
0.20 – 0.30 %	41-75 ppm	Alto
> 0.30 %	> 75 ppm	Muy alto

Contenido y formas en el suelo

- Varía en amplios rangos (0,01-0,5%), frecuentemente alrededor de 0,1%.
- Suelos ricos en N son una excepción, salvo acumulación de MO. En suelos cultivados es imprescindible su aporte.
- El contenido de N en suelo es muy variable.
- N inorgánico (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , N_2O y NO), menos del 2% del N total

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Ganancias

Fijación no simbiótica:

- Bacterias heterótrofas aerobias (*Azotobacter*, *Azomonas*, *Azotococcus*, *Beijerinckia*, *Derxia*), otras anaerobias (*Clostridium*) y otras anaerobios facultativos (*Bacillus*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*).
- Con abundancia de nitratos, la fijación se reduce.
- Cantidad fijada: 6-10 Kg/Ha y año.

Fijación simbiótica con leguminosas

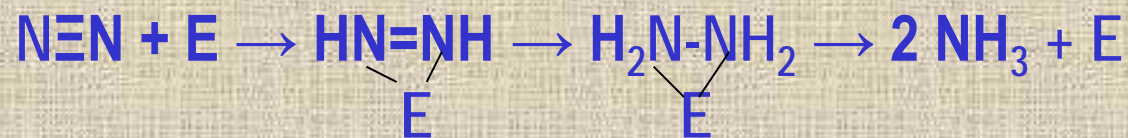
- Desde antiguo se sabe que trébol, alfalfa, guisantes, habas, lentejas, soja, etc., revitalizaban el suelo. A mediados del siglo XIX se observó la presencia de nódulos en esta serie de plantas (las leguminosas)

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Ganancias

Fijación simbiótica con leguminosas

- En 1888, Beijerinck aisló el microorganismo responsable (*Bacillus radicicola*, hoy género *Rhizobium* y afines). Están en casi todos los suelos en forma latente (bacteroides), al contacto con pelos absorbentes de leguminosas, penetran en sus tejidos y fijan N_2 .
- La molécula base en la fijación biológica del N_2 es el enzima nitrogenasa. Formada por dos componentes, componente I (cuatro subunidades, una cadena de Aa, 24 Fe-S y 2 Mo) y componente II (dos subunidades, 4 Fe-S).



- Cada leguminosa se encuentra asociada a una especie diferente.
- Cantidad fijada: Puede ser superior a 100 Kg/Ha y año.

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Ganancias

Fijación simbiótica con no leguminosas

- Actinomicetos del género *Frankia*, también forman simbiosis, con diferentes especies, ninguna de interés agrícola salvo *Rubus sp.*
- Otras como la del aliso, el helecho acuático *Azolla pinnata* y el alga cianoficea *Anabaena azollae* (abono en arrozales de Vietnam).
- Fijadores libres que se muestran más efectivos al asociarse con determinadas plantas superiores (maíz y *Spirillum lipoferum*, caña de azúcar y *Beijerinckia*, trigo y *Bacillus*, arroz y *Achromobacter*, algunas gramíneas y *Azospirillum*, etc.).
- Termes y carcomas también tienen fijadores de N_2 en su aparato digestivo.

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Ganancias

Otras aportaciones de N al suelo

- Formas de N en la atmósfera pueden ser arrastradas por lluvia y nieve:
 - Amoníaco.
 - Ácido nítrico.
 - N orgánico.
- Cantidad fijada: 1-20 Kg/Ha y año.

Aportes de fertilizantes

- En países desarrollados los mayores aportes de N a suelos de cultivo proviene de fertilizantes. Aportaciones típicas 100-300 Kg/Ha y año.

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Transformaciones

Aminificación y amonificación

• La MO depositada en el suelo no sirve para las plantas, pero es degradada por microorganismos hasta aminos y Aa (aminificación o aminización):

Proteínas y
Compuestos relacionados $\xrightarrow[\text{Microorganismos}]{\text{Digestión enzimática}}$ R-NH₂ + R-CHNH₂-COOH + CO₂ + Otros

El N de aminos y Aa puede ser utilizados por los microorganismos o transformado en compuestos aún más simples (amonificación):

R-NH₂ + H₂O $\xrightarrow[\text{Microorganismos}]{\text{Hidrólisis enzimática}}$ R-OH + NH₃ + E

R-CHNH₂-COOH + H₂O $\xrightarrow[\text{Microorganismos}]{\text{Hidrólisis enzimática}}$ R-CH₂OH + NH₃ + CO₂ + E

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Transformaciones

Aminificación y amonificación

- Tejidos jóvenes (con relación C/N baja, < 20) liberan apreciables cantidades de NH_3 .

Nitrificación

- Con condiciones favorables, parte del amoníaco liberado en el proceso anterior, es inmediatamente oxidado a nitrato, principal forma asimilada por las plantas.
- Esta reacción la llevan a cabo bacterias aerobias muy sensibles a agentes externos.

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Transformaciones

Nitrificación

- Unas oxidan el amoníaco a nitrito en la fase de nitrificación (*Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosococcus*, *Nitrosoglaca*, *Nitrosolobus*):



- Otras oxidan en nitrito a nitrato en la fase de nitratación (*Nitrobacter*, *Nitrocystis*, *Bactodema*):



NITRÓGENO en suelo: dinámica

Transformaciones

Nitrificación

- Es necesaria la presencia de NH_4^+ en exceso .
- Las bacterias nitrificantes actúan mejor en suelos neutros o ligeramente básicos (óptimo pH 6,9-7,5), la reacción se retarda en suelos ácidos (pH < 5,5), requieren un suministro adecuado de Ca, P, Cu y Mg, un exceso de Cl⁻ las paraliza.
- Son aerobios típicos, actúan en suelos bien aireados. La T^a óptima para la nitrificación es 27-30°C, se ralentiza a baja T^a (<5°C) y por debajo de 0°C se inhibe.
- La reacción global libera H⁺ y acidifica el suelo. Fertilizantes amoniacales de reacción ácida.

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Transformaciones

Nitrificación

- Es una reacción bastante rápida (pocas horas en condiciones favorables).
- Existen inhibidores de la nitrificación (nitrapirina, dicitandiamida, DMPP) que actúan sobre las bacterias reduciendo así las pérdidas de nitratos por lixiviación y desnitrificación.
- Estos compuestos actúan sobre las nitrosobacterias (*Nitrosomonas*).
- Muy efectivos al aportarlos con abonos amoniacales.

NITRÓGENO en suelo: dinámica

Pérdidas

Desnitrificación

- En suelos mal aireados (pesados) en anaerobiosis ciertos microorganismos pueden utilizar el O de los nitratos, dando de nuevo N₂.

Descomposición de nitritos

- Idem que antes a partir de nitritos, aunque no es un proceso importante.

Volatilización del amoníaco

- Con acumulación de amoníaco (aportes de MO con C/N baja, < 15-20), suelos mal aireados con nitrificación impedida, suelos alcalinos con baja CCC (fijación escasa del amonio):



NITRÓGENO en suelo: dinámica

Pérdidas

Lixiviación de nitratos

- Los nitratos son muy solubles y no retenidos por los coloides. Lluvias intensas o riegos copiosos los lavan del perfil.
- También pueden ascender (capilaridad).

Fijación del amonio en el complejo coloidal

- Amonio intercalado en red de arcillas 2x1 o por MO (pérdida eventual)

Extracción por los cultivos

- En agricultura intensiva 50-250 Kg/Ha y año. Valor típico 100 Kg/Ha y año.

Ciclo del N

- 450 M Tm/año fijado biológicamente. Balance con desnitrificación. Hoy no

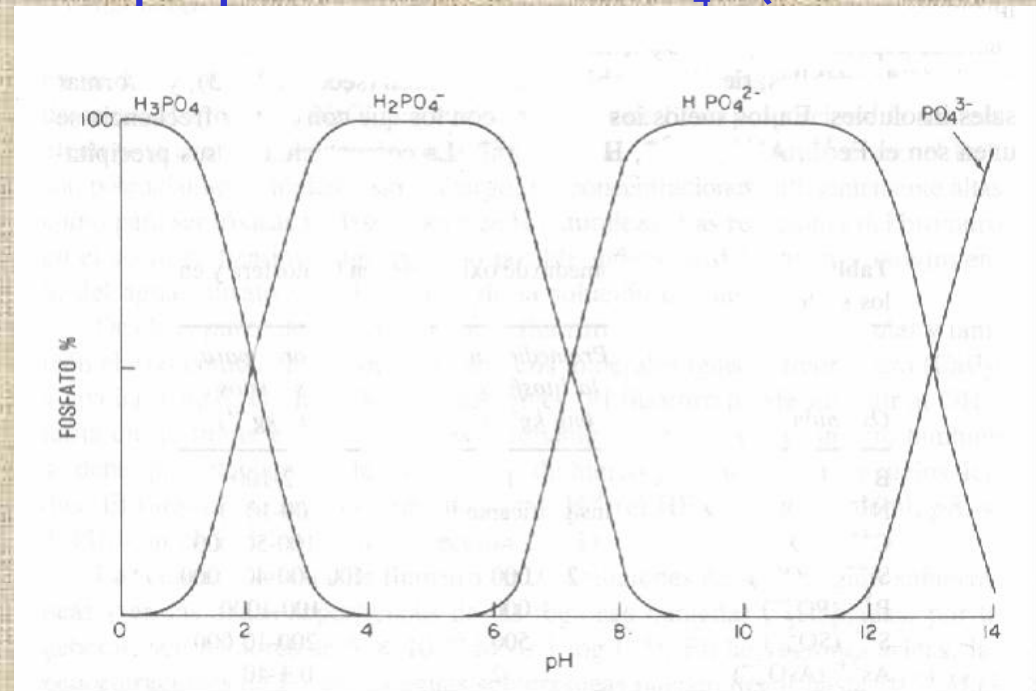
FÓSFORO en planta

Esencialidad

- Boussingault (1834) primero en sugerir esencialidad del P, ratificada posteriormente por Liebig, Lawes y Gilbert y Salm-Horstmar.

Contenido y formas

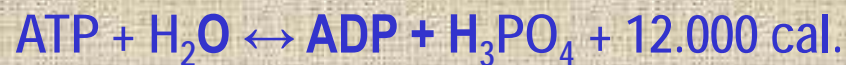
- Se absorbe como H_2PO_4^- y en menor proporción como HPO_4^{2-} (10 veces menos), aunque depende del pH



FÓSFORO en planta

Contenido y formas

- Las plantas presentan una elevada capacidad de acumular fosfato (concentración 1000 veces mayor en xilema que en la solución del suelo).
- Se encuentra en planta formando combinaciones orgánicas (lecitinas, ácidos nucleicos, fitina, coenzimas como NAD, NADP, FAD, CoAsH, etc.). También en forma iónica libre (75% del mismo en vacuolas desde donde se moviliza).
- Mención especial merecen los compuestos fosforados en cargados de almacenar y transportar la energía (AMP, ADP y ATP). La energía liberada en oxidación de glúcidos, lípidos y próticos se almacena como ATP. La hidrólisis de éste libera E:



$\text{ADP} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{AMP} + \text{H}_3\text{PO}_4 + 12.000 \text{ cal.}$ El AMP se hidroliza más difícilmente y libera sólo 3.000 cal.

FÓSFORO en planta

Funciones

- El P acelera los procesos de maduración, fomenta la extensión de las raíces y su ramificación lateral



FÓSFORO en planta

Funciones

- El P es constituyente de numerosos compuestos esenciales en el metabolismo, es esencial en la síntesis proteica (ácidos nucleicos) y además es esencial a través de funciones como:
 - Biosíntesis de glúcidos (fotosíntesis: ATP, NADPH₂, Ri-DP)
 - Biosíntesis de lípidos (a partir de triosa fosfato y acetilcoenzima A)
 - Síntesis de clorofilas y carotenoides (a partir de glicina y succinil coenzima A y isopentenil pirofosfato, respectivamente)
 - Glucólisis y metabolismo de ácidos grasos (ATP, acetilcoenzima A, NADP, FAD, TPP, etc.)

FÓSFORO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia: Retraso y desarrollo débil del vegetal (tanto parte aérea como raíz), retraso en la maduración. Hojas delgadas, erectas y de menor tamaño con nerviaciones poco pronunciadas.



Deficiencia en trigo



Deficiencias en maíz



Deficiencia en pepino



FÓSFORO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia: Tejidos deficientes en P toman tonalidades violetas o púrpura, la reducción en la síntesis de proteínas provoca un incremento en relativo de azúcares que promueve la síntesis de antocianinas.



Deficiencia: Es móvil, los primeros síntomas de deficiencia se dan en hojas viejas. Es importante en la formación de semillas (cereales).

Exceso: Un exceso de fósforo puede inducir deficiencia de Fe y Zn

FÓSFORO en suelo

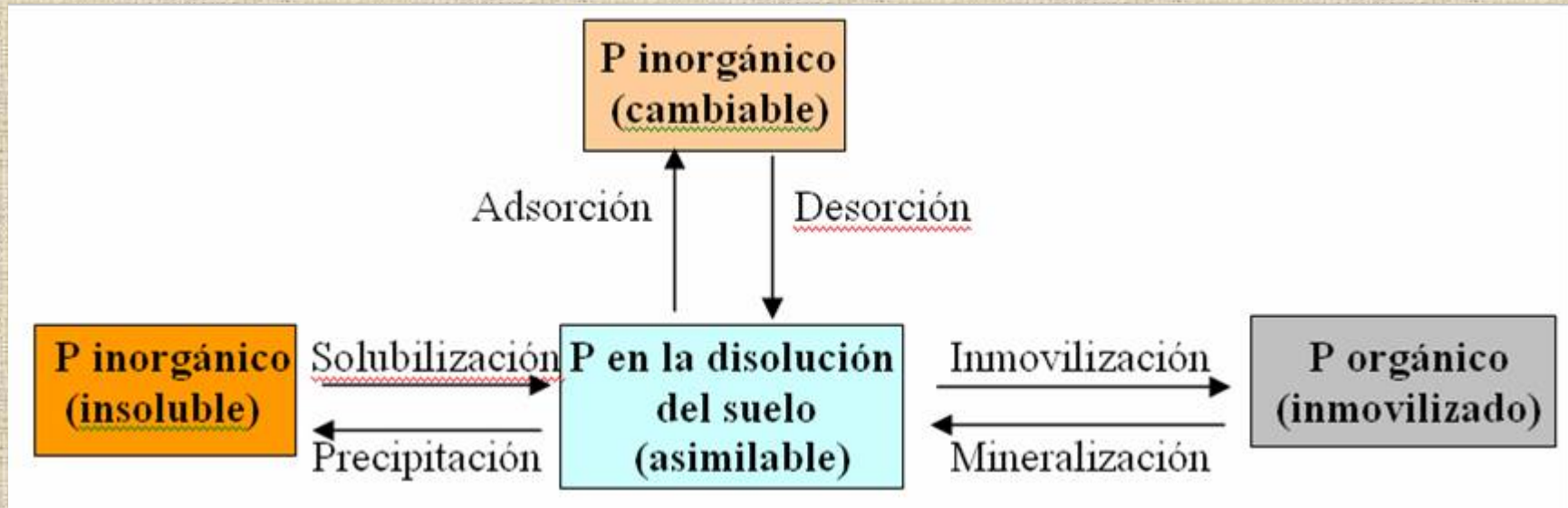
Origen, contenido y formas del fósforo en el suelo

- Procede de la descomposición de la roca madre y representa alrededor del 0,1% de la corteza terrestre.
- Mucho más abundante en rocas volcánicas (apatito) que en sedimentarias.
- Predomina el P inorgánico sobre el orgánico.
- P inorgánico:
 - Fosfatos que contienen Ca (predominantes).
 - Fosfatos que contienen Fe y Al, insolubles en suelos ácidos (variscita, stremgita, vivianita, dufrenita, wavellita, taranakita, etc.).
- P orgánico: Fosfolípidos, ácidos nucleicos, fitina y derivados.

FÓSFORO en suelo: dinámica

Generalidades

- La mayor parte del P del suelo está en formas insolubles. El equilibrio que gobierna su dinámica:



- Varios factores pueden modificar este equilibrio, sobre todo el pH

FÓSFORO en suelo: dinámica

Fósforo inorgánico

- Puede quedar bajo forma no asimilable según procesos como:
 - Con alta acidez: Precipitando con Fe y Al, Ej: $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$
 - Con acidez menor: reacciona con hidróxidos de Fe y Al formando fosfatos hidroxilados, Ej: $\text{FeH}_2\text{PO}_4(\text{OH})_2$
 - Las arcillas lo fijan, fundamentalmente a través de puentes de Ca



- Los fosfatos pueden bloquearse entre laminas de arcillas 2x1, con espesor por debajo de 10 Å.
- Con alcalinidad forma fosfatos cálcicos insolubles: CaHPO_4 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, o tipo apatito por encima de pH 8.
- Puede fijarse a humatos cálcicos



FÓSFORO en suelo: dinámica

Fósforo inorgánico

- pH óptimo para su asimilación 6,5

Fósforo orgánico y microorganismos

- Bacterias del género *Bacillus* y levaduras lo mineralizan a fosfatos.
- Captación de iones fosfato: papel de las micorrizas.

Pérdidas de P

- Extracción por los cultivos (4-6 Kg/Ha y año, en intensivo 20-40 Kg/Ha y año y resulta necesario su aporte).
- Lixiviación: generalmente escasas, pero pueden ser importantes con el empleo de fertilizantes solubles.
- Erosión: notables por estar el P en capas superficiales.
- Volatilización: fosfamina (PH_3) en condiciones anaerobias.
- Papel del fertirriego.

POTASIO en planta

Esencialidad

- Puesta de manifiesto por Salm-Horstmar con SNs a mediados del XIX. Después Birner y Lucanas y posteriormente Nobbe, lo ratificaron.

Contenido y formas

- Se absorbe como K^+ .
- Su contenido fluctúa bastante según órgano y especie. En hortícolas se alcanzan niveles foliares del 5% sms.
- Los frutos son un sumidero (sink) muy importante de K.
- Es el principal catión de los jugos vegetales, uniéndose a aniones orgánicos (oxalatos, tartratos) e inorgánicos (fosfatos, nitratos).
- Se encuentra siempre en forma iónica, lo que justifica su movilidad.

POTASIO en planta

Funciones

- No entra en la composición de los principios esenciales (prótidos, lípidos y glúcidos): por su movilidad actúan neutralizando ácidos y asegurando la estabilidad del pH.
- Además actúa en:
 - Fotosíntesis (pH óptimo, apertura estomática).
 - Economía hídrica (se encarga del cierre estomático, turgencia, ahorro agua)
 - Síntesis proteica (implicación del K en la síntesis de ATP)
 - Formación y transformación del almidón.
 - Transporte de fotosintatos (azúcares hacia sumideros).
 - Activación enzimática (más de 60 enzimas)

POTASIO en planta

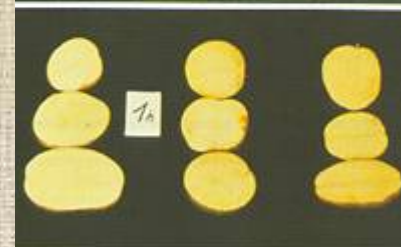
Alteraciones por deficiencia y exceso

• Deficiencia:

- Inicialmente en hojas viejas. Da lugar a retraso de crecimiento sobre todo en órganos de reserva (semillas, frutos, tubérculos) que necesitan glúcidos para su formación.
- Tallos más delgados. Moteado clorótico en hojas viejas, con necrosis en bordes y ápices, que tienden a curvarse hacia arriba. Con deficiencia de K se acumulan diamidas (putrescina) que necrosa tejidos.
- Importante incidencia en el rendimiento.
- Elevados aportes de N y P, favorecen su deficiencia. También niveles elevados de Mg y NH_4^+ . Ojo a la relación N/K.



Deficiencia en maíz



Deficiencia en patata



Deficiencias en manzano



Deficiencia en pepino

POTASIO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso



Blotchy ripening, relación N/K muy elevada

• Exceso:

-Poco frecuente, antagonismos con Mg, Ca, Fe y B.

POTASIO en suelo

Contenido y formas

- Aparte del procedente de fertilizantes, el K del suelo proviene de la roca madre. Minerales que contienen K: feldspatos, moscovita, biotita, silvina, carnalita, silvinita, kainita, etc., y minerales secundarios como illita, vermiculita, clorita, etc.
- Está en el suelo en cantidades relativamente grandes (0.5-3%).

Dinámica

- Tres categorías según asimilabilidad:
 - K no asimilable (98%): Estructuras y redes cristalinas de minerales primarios y secundarios.
 - K asimilable (1-2% del total): Soluble (10%) y adsorbido (90%), en equilibrio dinámico y específico de cada suelo.
 - K lentamente asimilable: Fijado a coloides, entre láminas de arcilla.

POTASIO en suelo

Pérdidas

- Lixiviación: puede ser muy importante sobre todo con sobrefertilización de suelos arenosos.
- Extracción por cultivo: 100-200 Kg/Ha y año o más. "Consumo de lujo".
- Erosión: Grandes cantidades de K en porción superficial.

AZUFRE en planta

Esencialidad

- Sugerido como esencial por De Saussure (1804), aunque su demostración definitiva a partir de 1860 con las experiencias de Salm-Horstmar y Sachs y Knop.

Contenido y formas

- Se absorbe como SO_4^{2-} . En pequeñas cantidades también como SO_3^{2-} y como SO_2 por las hojas.
- Como el N, la mayor parte se reduce en planta (cloroplastos) a compuestos sulfhídricos (-SH), y así se integra a compuestos orgánicos. Una pequeña parte permanece como sulfatos (regulación osmótica).
- A diferencia del N, el azufre reducido puede ser reoxidado a sulfato y permanecer así como reserva.
- Los contenidos son variables entre 0,1-1% de S sms.

AZUFRE en planta

Funciones

- Participa en:

- Biosíntesis de lípidos, clorofilas, carotenos y ácidos orgánicos (como el P).
- Biosíntesis de los Aa azufrados cisteína, cistina y metionina (esencial en la síntesis de proteínas), además puentes disulfuros –S-S- determinan la estructura terciaria de proteínas.
- Formación de Acetil coenzima A.
- Constituyente de ferredoxinas.
- Constituyente de vitaminas (tiamina, biotina), ácido lipoico, coenzima A, etc.
- Formación de fitoquelatinas, con elevado número de residuos cisteína que complejan metales pesados en exceso (Cd, Cu, Zn) previniendo su toxicidad.

AZUFRE en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia:

- Últimamente más patente por menos utilización de fertilizantes tipo superfosfato de cal y sulfato amónico, y menos uso de S como insecticida y fungicida.

- Síntomas similares a N: retraso del crecimiento, clorosis uniforme de hojas si bien los primeros síntomas se ven en hojas jóvenes.



Deficiencia en crisantemo

AZUFRE en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso



Deficiencia en judía



Deficiencia en tabaco



Deficiencia en limonero



Deficiencia en peral

Exceso:

-Es utilizado extensamente desde hace tiempo (plaguicida, fertilizante, enmienda) sólo se puede considerar tóxico (perjudicial) cuando sobrepasa las 1000 ppm de sulfato en planta o 0,5% de S sms en hoja.

-Los síntomas son clorosis seguidas de necrosis y quemaduras en hojas.

-El S y el N deben mantener una relación más o menos constante 1:15-16.

AZUFRE en suelo

Origen, contenido y formas

- La mayor parte procede de descomposición de sulfuros metálicos (pirita, calcopirita, blenda, galena) constituyentes de rocas ígneas, que al degradarse se oxidan a sulfato (yeso) que es la forma más común presente en los suelos.
- En zonas húmedas también se puede encontrar bajo formas orgánicas.
- En zonas industriales o con emanaciones volcánicas gran cantidad de SO_2 puede depositarse en el suelo.
- El contenido medio de S en suelo es 0,02-0,05%, aunque en regiones áridas puede llegar al 1%, principalmente en zonas superficiales como sulfatos de calcio (yeso) o magnesio.

AZUFRE en suelo

Dinámica

• Tres procesos definen la dinámica del S en suelo:

- Mineralización del S orgánico: Que se transforma en ácido sulfhídrico (SH₂) por acción de bacterias.

- Oxidación del S mineral (sulfooxidación):



Estos sulfatos pueden perderse por lixiviación, ser adsorbidos (suelos ricos en caolinitas, hidróxidos de Fe y Al, MO).

Esta reacción es usada como enmienda de suelos básicos y salinos

AZUFRE en suelo

Dinámica

- Reducción de S mineral: En anaerobiosis el sulfato puede pasar a sulfuro por bacterias sulfato-reductoras.



Pérdidas

- Erosión.
- Lavado.
- Extracción por cosechas (30-40 Kg/Ha y año).

CALCIO en planta

Esencialidad

- Aceptado como esencial con las experiencias de Salm-Horstmar y Sachs y Knop a mediados del siglo XIX.

Contenido y formas

- Se absorbe como Ca^{2+} . En plantas jóvenes se encuentra en protoplasma y membranas celulares y en adultas fundamentalmente en vacuolas como oxalato cálcico.
- A pesar de ser absorbido en gran cantidad (contenidos en tejidos entre 0,1-8%), la concentración del Ca libre en citoplasma y cloroplastos es muy baja ($1 \mu\text{M}$).
- Está en forma mineral soluble (sulfatos), mineral insoluble (fosfatos y carbonatos) y especialmente en forma orgánica (oxalatos y pectatos).
- En mayor cantidad en hojas y tallos que en semillas y frutos.

ABSORCIÓN DEL CALCIO Y DINÁMICA EN LA PLANTA

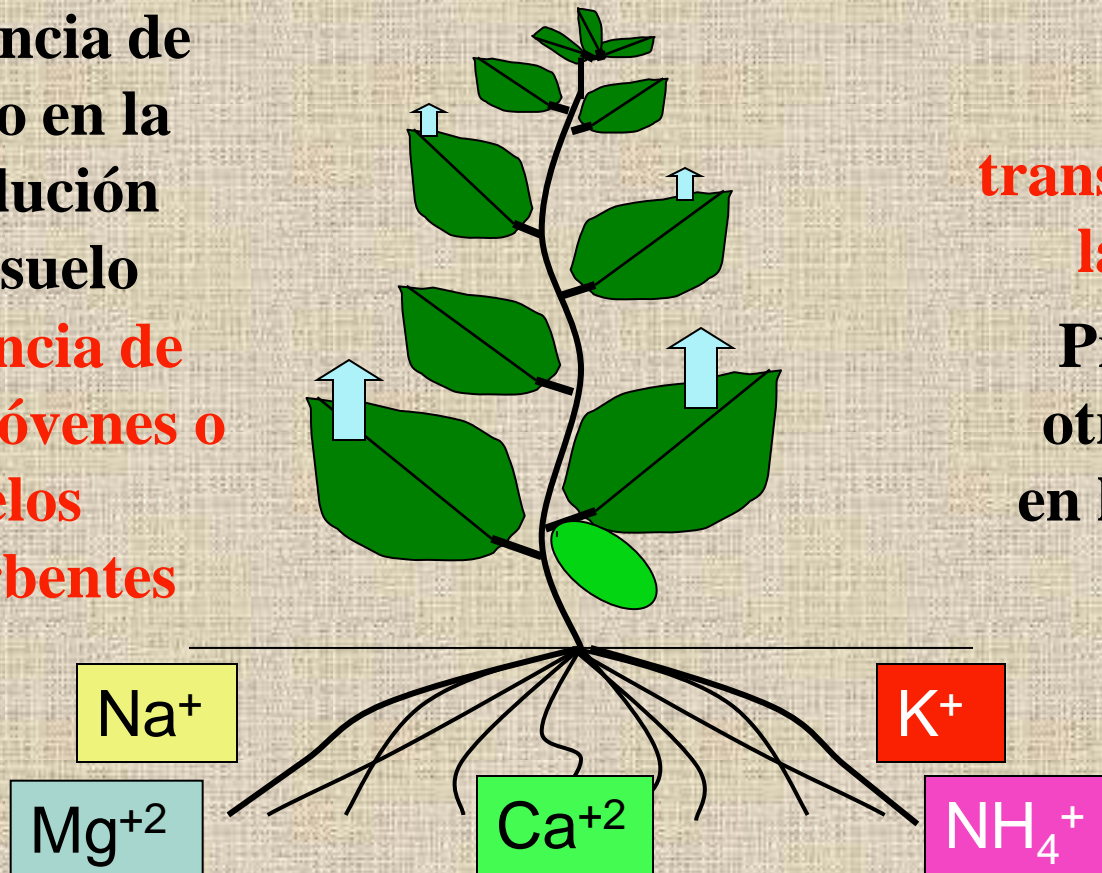
• Factores influyentes en la absorción del calcio

Presencia de calcio en la disolución del suelo

Presencia de raíces jóvenes o pelos absorbentes

Flujo transpirativo de la planta

Presencia de otros cationes en la disolución del suelo



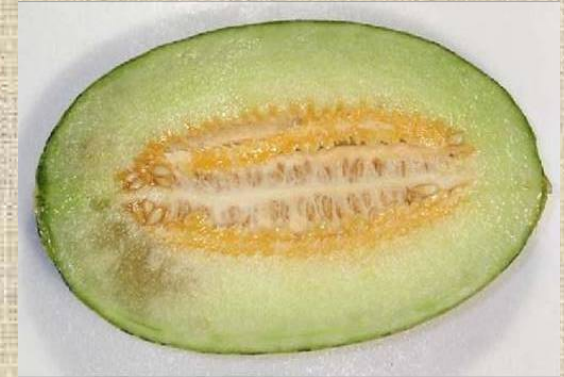
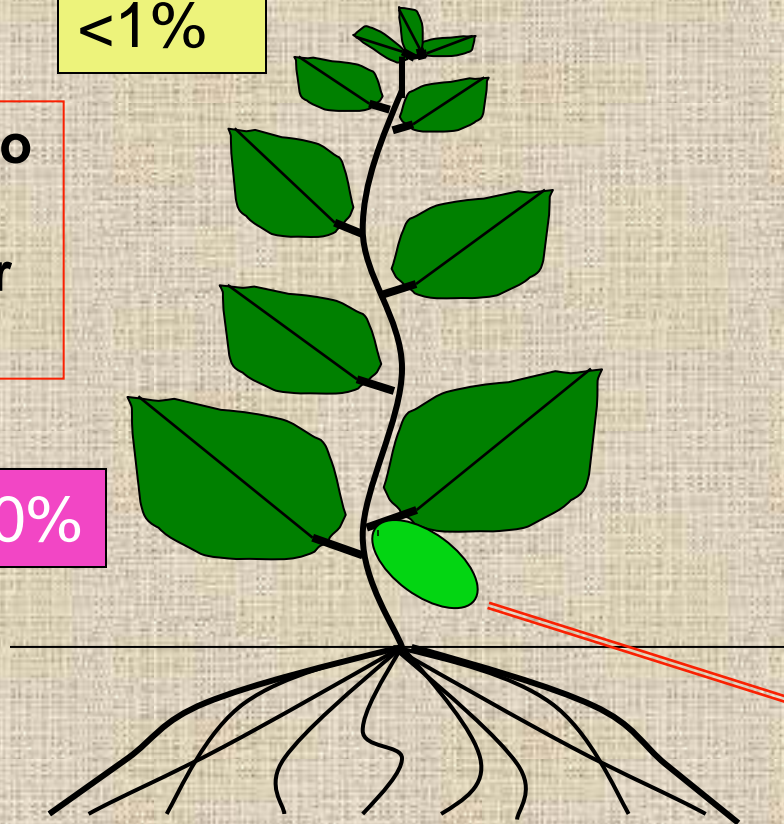
ABSORCIÓN DEL CALCIO Y DINÁMICA EN LA PLANTA

•Distribución del calcio en la planta

<1%

Flujo transpirativo
bajo y alto:
competencia por
agua y calcio

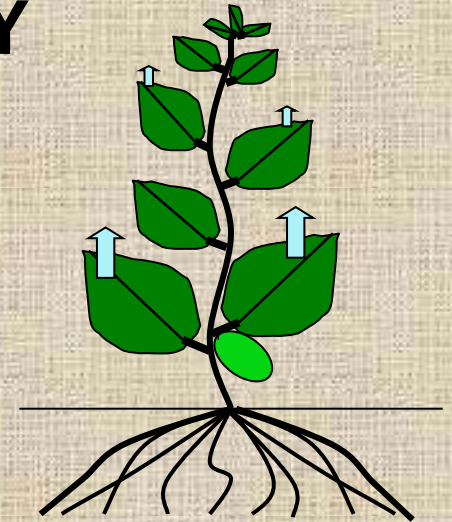
>10%



Corteza : 0.2-0,4%
Pulpa: <0,01%

ABSORCIÓN DEL CALCIO Y DINÁMICA EN LA PLANTA

- Movilidad del calcio en la planta:
PRÁCTICAMENTE NULA

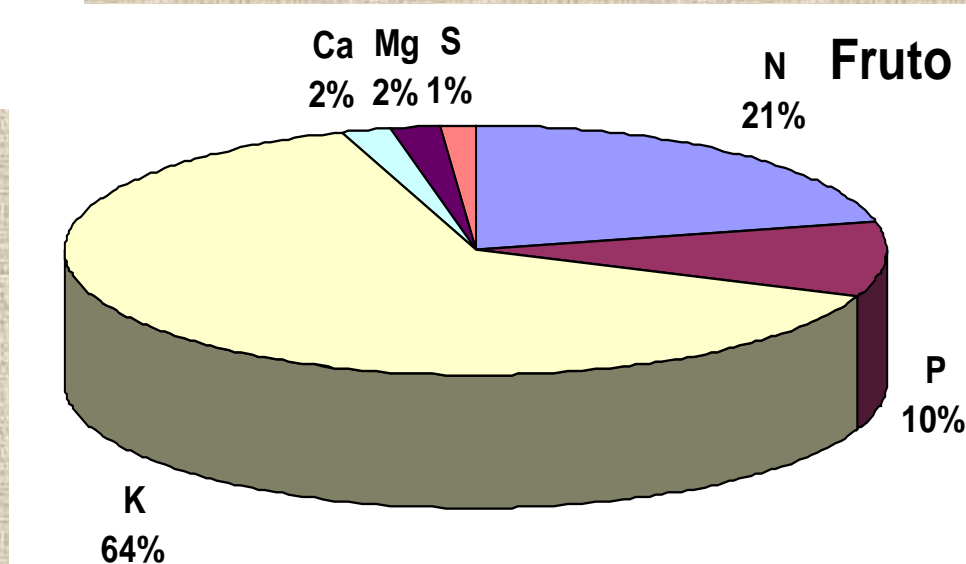
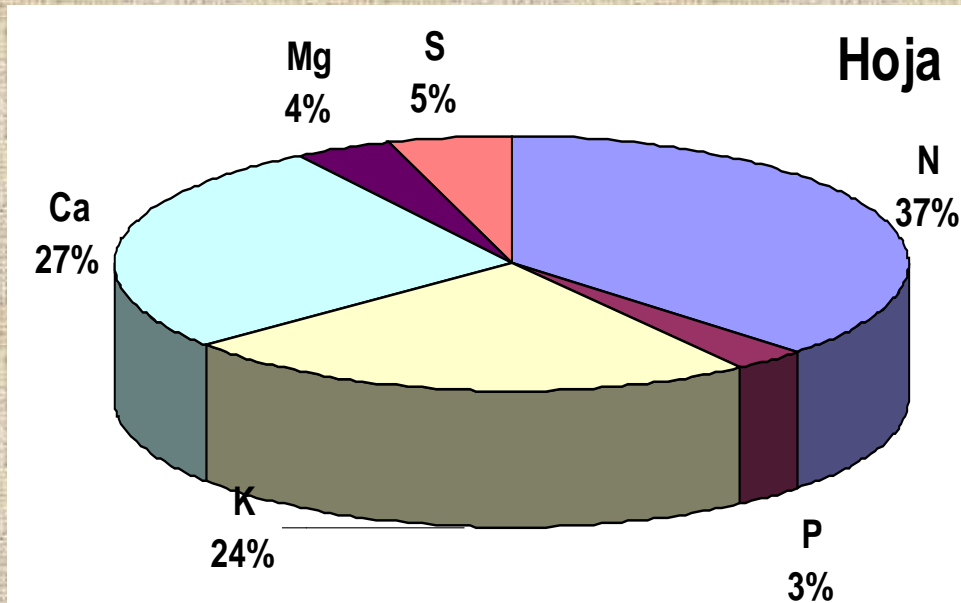


- Consecuencias de ello:

- ✓ No existe calcio de reserva como en otros nutrientes.
- ✓ Necesidad de un suministro continuo.
- ✓ Ajuste del suministro al desarrollo vegetal.
- ✓ Importancia de la transpiración del fruto: pepino (20-30 estomas/mm²) vs tomate o manzana (≤ 1 estomas/mm²), deficiencias con transpiración alta o baja.
- ✓ Importancia de los pelos absorbentes.



Manzana



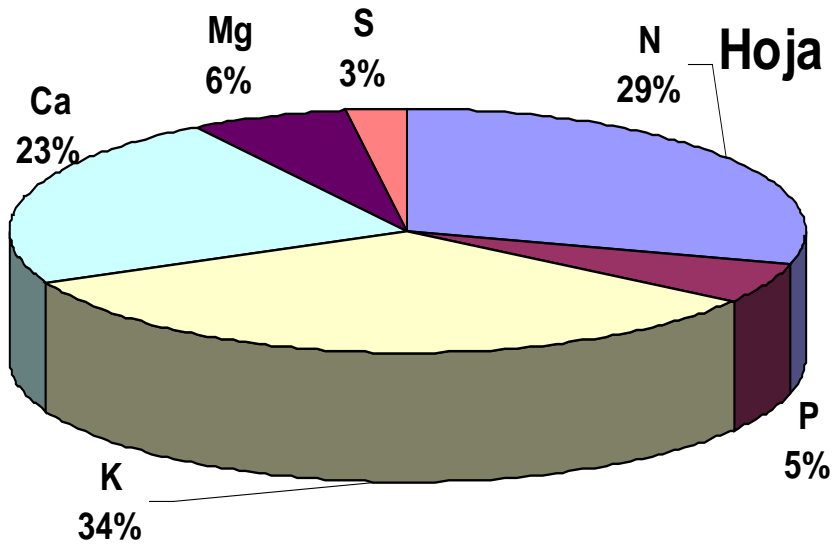
El potasio se moviliza desde las hojas a los frutos, el calcio queda fijado en las hojas

Resultado: Bitter Pit

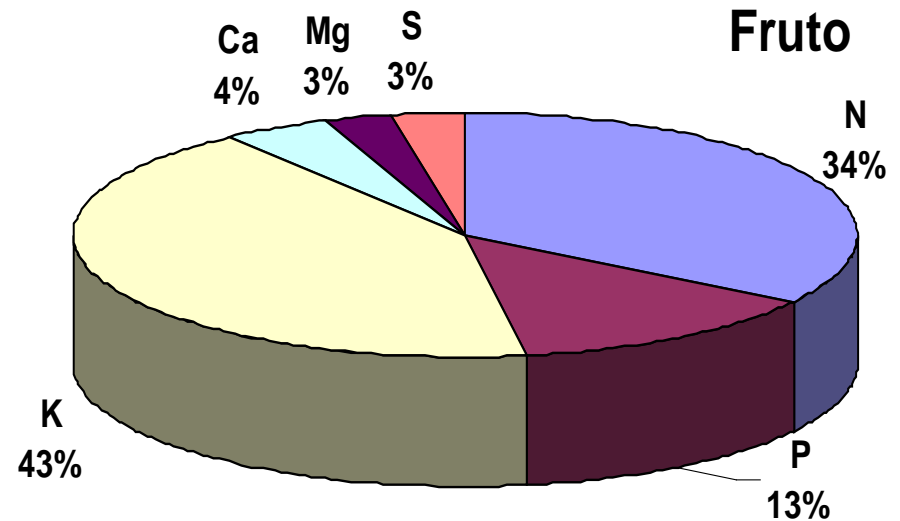
- Un flujo insuficiente de calcio a los frutos de manzana ocasiona Bitter Pit









Fresa



El potasio se moviliza desde las hojas al fruto, el calcio es fijado en las hojas



Resultado: Botrytis

	Suelo A	Suelo B	
Fertilización con calcio			El calcio en los frutos otorga tolerancia a enfermedades y resistencia a la fruta comercializada
Fertilización sin calcio			
Agua sin fertilización			

CALCIO en planta

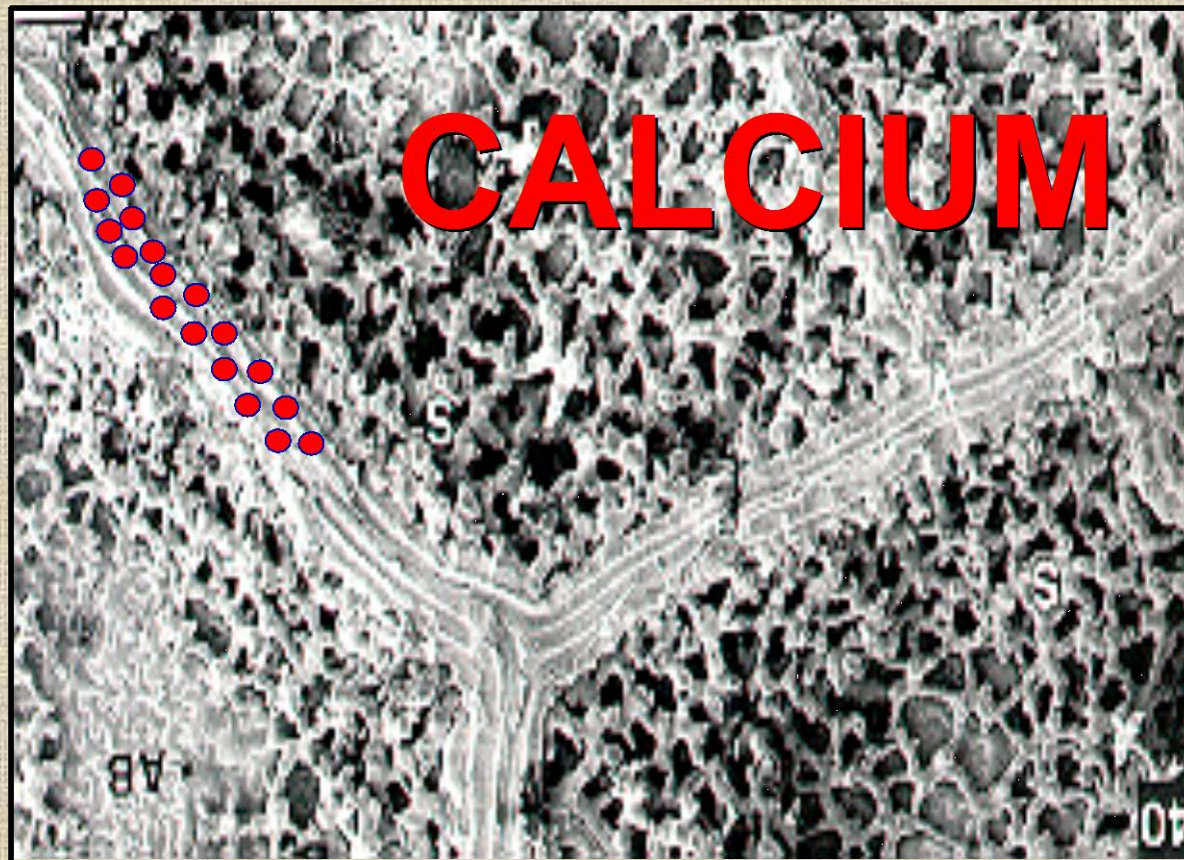
Funciones

- **Función principal: AGENTE ESTABILIZANTE ESTRUCTURAL DE PAREDES Y MEMBRANAS CELULARES (junto al B). Consecuencia: estabilidad de los tejidos**

- **Otras funciones:**

- Desarrollo de raíces (multiplicación y elongación celular).
- Regula la absorción del nitrógeno.
- Transporte de azúcares y proteínas en la planta.
- Neutraliza ácidos orgánicos.
- **Activador enzimático: Modula más de 150 enzimas, directamente o a través de la calmodulina (proteína de 148 Aa y 4 Ca que regula el nivel de Ca citoplasmático, si se eleva se activa la senescencia).**
- Regula la acción de fitohormonas (AIA).
- Selectividad de las membranas.
- Contrarresta efectos de otros iones y metales pesados en exceso.
- Desarrollo del tubo polínico.
- Control de la economía hídrica de la planta.
- Etc.

Más del 90% del calcio funcional en las paredes de las células



El calcio mejora el desarrollo de las raíces

- Mermas en el desarrollo de la raíz y la parte aérea



El calcio mejora la presencia de la hoja

Tip Burn en

- Lechuga
- Col
- Coliflor



Internal Browning en

- Col china
- Col de Bruselas



El calcio evita fisiopatías y podredumbres en la parte apical

Ejemplos

- Potato skin blemishes
- Blossom end rot
 - Tomates
 - Pimientos
 - Melones
- Cicatriz y rotura pistilar cítricos
- Cavity spot en zanahorias



El calcio mejora la vida postcosecha

Ejemplos

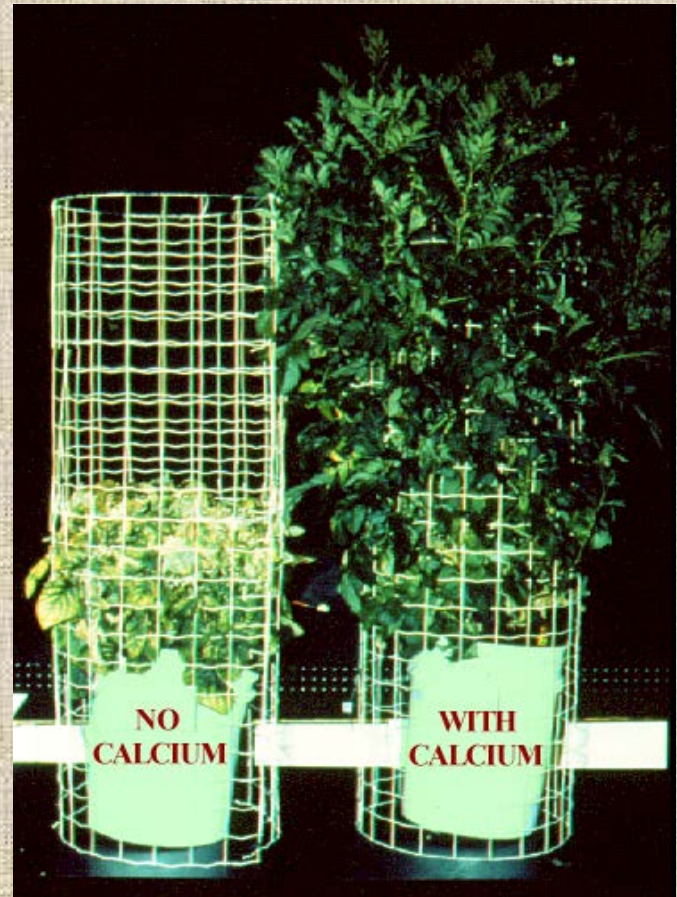
- Bitter Pit en manzanas
- Raíces del bulbo en cebollas
- Erwinia Soft Rot en patatas



El calcio mejora la tolerancia al estrés

Ejemplos

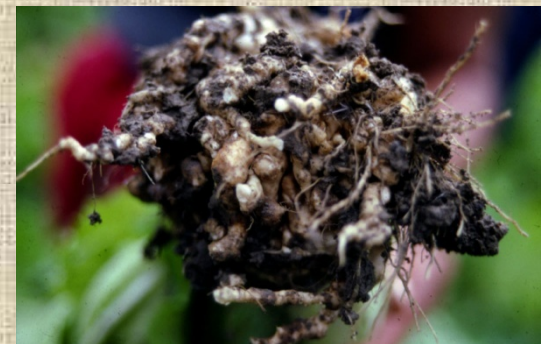
- Calor
- Viento
- Heladas



El calcio favorece la tolerancia a enfermedades

Ejemplos

- Botrytis
 - Lechuga
 - Rosa
 - Fresa
- Erwinia soft rot en patatas
- Clubroot en brassicas



Factores que condicionan la asimilación del Ca

- **Bajo nivel de Ca disponible.**
- **Niveles altos de transpiración (T^a , HR).**
- **Niveles muy bajos o nulos de transpiración (T^a , HR, luz).**
- **Inadecuado manejo hídrico.**
- **Elevada salinidad.**
- **Pobre desarrollo y actividad radicular.**
- **Ritmo de crecimiento excesivamente vigoroso (N).**
- **Presencia de iones antagónicos en su absorción (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{+2}).**
- **Inadecuado suministro de B.**
- **pH alcalino del suelo (no presencia de H^+).**
- **Pobre diferenciación de vasos del xilema (tejidos muy jóvenes, frutos).**



CALCIO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia:

- En suelos ácidos de elevada pluviometría o en suelos salinos (Na).
- Síntomas: Clorosis, detiene el desarrollo de raíz, hojas arrolladas con necrosis en bordes. Estos síntomas en hojas jóvenes.
- Con elevado flujo transpirativo, los órganos de menor transpiración (frutos, hojas internas) presentan deficiencia de Ca.

- Exceso:

- Como tal no es corriente, pero sí de forma indirecta con la elevación del pH de suelos calizos (Fe, Zn, Cu, P).

Síntomas de deficiencia cálcica



Deficiencias en tomate, rizado hacia arriba, extremo apical doblado hacia abajo, venas pardas en las hojas



Deficiencia en patata



Deficiencia en lechuga "tip burn"



Blossom end rot en el fruto de tomate



Deficiencia en manzana (bitter pit)





Deficiencia en girasol



Deficiencia en algodónero



Deficiencia en hoja más joven de maíz doblada hacia abajo



Deficiencia en tomate

CONCLUSIONES

Consideraciones para una mejor asimilación del Ca

- **Mantenimiento de adecuados niveles de Ca (≥ 4 mM en relación similar a K y doble de Mg).**
- **Evitar niveles excesivos de N y utilizar preferentemente formas nítricas.**
- **Utilizar retardadores del crecimiento.**
- **Sombrear y elevar la HR en situaciones de elevada transpiración (invernaderos).**
- **Seleccionar variedades resistentes a fisiopatías cálcicas.**
- **Mantener una raíz continuamente activa (enraizantes, MO fácilmente degradable, buena estructura del suelo).**
- **Mantener controlados los niveles de CE y de sodio en particular.**
- **Aporte de Ca nocturno (gutación).**



CONCLUSIONES

Consideraciones para una mejor asimilación del Ca

- Utilizar complejantes que puedan liberar Ca del suelo o lo mantengan en solución (Ca ligado o complejado por ácidos orgánicos), así como enmendantes ácidos (S) y favorecer la nitrificación (suelo bien oxigenado).
- Aplicaciones dirigidas al fruto sobre todo inmaduro (sales cálcicas 0.1-0.2% en Ca o Ca complejado).
- Mantener niveles de B balanceados con los de Ca.
- Suministro continuado de Ca (no hay Ca de reserva) y adaptado al ritmo de crecimiento de planta y frutos.
- Realizar seguimiento analítico de frutos más que foliar ($>0.08\%$ en tomate y pimiento; $>0.2\%$ en pepino; $> 0.15\%$ o 35-40 mg/Kg fruta fresca en manzana).



CALCIO en suelo

Origen, contenido y formas

- Aparte del añadido como fertilizante o enmienda, el Ca del suelo procede de la descomposición de rocas y minerales: Carbonatos (calcita, dolomita), fosfatos (apatitos), sulfatos (yeso), silicatos (feldespatos, anfíboles).
- En suelos no calizos los contenidos son del 0,1-0,2%, y en los calizos se puede alcanzar el 25%.

Dinámica

- Pérdidas:
 - Lixiviación: En suelos ácidos de elevada pluviometría.
 - Extracción por plantas: 50-150 Kg de Ca/Ha y año.
 - Erosión.

CALCIO en suelo

Encalado

• Enmienda de suelos ácidos por aplicación de cales agrícolas (óxido de Ca, hidróxido de Ca, carbonato de Ca, carbonato de Ca-Mg, silicatos de Ca, etc.). Dos procesos simultáneos tienen lugar:

- Solubilización y formación de bicarbonato:



- Adsorción del Ca al complejo coloidal

Con el tiempo se va perdiendo Ca por lixiviación y se va sustituyendo el Ca del complejo coloidal por H^+ , hasta que es necesaria una nueva enmienda.

MAGNESIO en planta

Esencialidad

- Sugerido como esencial por Liebig (1843), confirmado definitivamente con las experiencias de Salm-Horstmar, Sachs y Knop y Raulin.

Contenido y formas

- Se absorbe como Mg^{2+} . Contenidos en planta medio sobre 0,5% sms.
- Constituyente de la clorofila, el 15-20% del Mg de las hojas se encuentra formando parte de su molécula. Constituyente también de la fitina.
- Cerca del 70% asociado a aniones inorgánicos y orgánicos (malato, citrato, pectato, oxalato).

MAGNESIO en planta

Funciones

- Esencial en fotosíntesis (clorofila).
- Activa más enzimas que cualquier otro elemento, por ejemplo es activador específico de la Rubisco, y resulta esencial en glucólisis, ciclo de los ácidos tricarboxílicos, síntesis de ácidos nucleicos, etc.

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia:
 - Normalmente deficiencia débiles. Exceso de K y/o Ca y deficiencia de N pueden inducir su deficiencia.
 - Muy móvil por el floema, primeros síntomas en hojas adultas (hojas senescentes)

MAGNESIO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia:

- Síntomas: Zonas cloróticas simétricas al limbo, con necrosis posterior. Es común la caída de hojas afectadas (enfermedad del pincel).
- Antes de síntomas, ya es patente el descenso de rendimientos.
- La deficiencia de Mg hace la planta más sensible a bajas T^a y heladas.



MAGNESIO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso



Deficiencia en cerezo



Deficiencia en patata



Deficiencias en vid

- Exceso: Raras, sólo al aplicar gran cantidad de Mg en suelos pobres en Ca y/o K.

MAGNESIO en suelo

Origen, contenido y formas

- Muy abundante en la corteza terrestre (2,3%). Se encuentra formando parte de silicatos (biotina, serpentina, olivino), carbonatos (magnesita, dolomita) y en regiones áridas como sulfato.

Dinámica

- Al descomponerse rocas y minerales el Mg pasa a sales solubles (sulfatos, cloruros) y así puede perderse por lixiviación, adsorberse a coloides, ser absorbido por plantas y microorganismos, reprecipitarse como minerales secundarios de Mg, etc.
- Al igual que el K, tenemos categorías según asimilabilidad:
 - Mg no asimilable: Estructuras y redes cristalinas de minerales primarios y secundarios.
 - Mg lentamente asimilable: Fijado entre láminas de arcilla.

MAGNESIO en suelo

Dinámica

- Mg intercambiable: Adsorbido a superficies coloidales.
- Mg rápidamente asimilable: Presente en la disolución del suelo.
- Relación Ca/Mg o K/Mg (fuertes fertilizaciones potásicas) muy elevadas, presencia de Na, baja T^a del suelo, etc., dificultan su absorción.

Pérdidas

- Lixiviación: suelos arenosos de elevada pluviometría.
- Extracción por plantas: 20-30 Kg/Ha y año.
- Erosión.

HIERRO en planta

Esencialidad

- Puesta de manifiesto por Sachs (1865), aunque muchos científicos previamente lo habían sugerido (Gris, 1843).

Contenido y formas

- Se absorbe como Fe^{2+} o como quelatos de Fe. La forma Fe^{+3} es de menor importancia por su solubilidad.
- Parece que las plantas oxidan el Fe^{+2} en raíz para traslocarlo a la parte aérea como citrato férrico.
- Genéticamente existen plantas eficientes para absorber hierro: Bajan hasta 2 ud. el pH de rizosfera excretando ácidos cafeico, mugínico, avénico, cítrico; alguno de los cuales además compleja al hierro y lo aísla del medio. Las gramíneas excretan fitosideróforos (compuestos aminados) capaces de movilizar Fe^{+3} e introducir esa forma al interior de la planta.

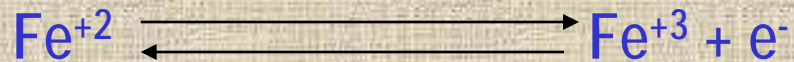
HIERRO en planta

Contenido y formas

- Contenidos medios de 25-250 ppm sms.
- En hojas (cloroplastos) el Fe es más abundante (80% del hierro total, y es el considerado Fe activo, siendo el restante de reserva).

Funciones

- Basadas en su tendencia a formar quelatos complejos y a su aptitud para cambiar de valencia (procesos redox):



HIERRO en planta

Funciones

- Interviene en muchos procesos esenciales formando parte de sistemas enzimáticos:
 - Enzimas con estructura Fe-porfirina (hemoproteínas): Citocromos, peroxidas, catalasa.
 - Enzimas sin estructura Fe-porfirina (proteínas Fe-S): NADH-citocromo C-reductasa, deshidrogenasa succínica, ferredoxina, nitrogenasa, sulfato reductasa.
- Así es esencial en:
 - Fotosíntesis, síntesis proteica, fijación del N_2 atmosférico, reducción de nitratos, síntesis de clorofila, etc.

HIERRO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia:

- Amarilleamiento de zonas intervenales permaneciendo verde oscuro los nervios, si avanza la deficiencia ocurre una pérdida total de clorofila.

- Primeros síntomas en hojas jóvenes.

- Disminución del crecimiento, tallos finos y curvados, defoliación, acumulaciones de ácido cítrico, nitratos, Aa, inhibición en la respiración, disminución de actividades peroxidasa, catalasa y aconitasa, etc.

- Elevados niveles de caliza, metales pesados (Cu, Zn, Co, Mn), bicarbonatos, inducen la deficiencia de Fe. Como también una baja actividad radicular, baja intensidad lumínica o deficiencia de K.

HIERRO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso



Deficiencias
en cerezo



Deficiencia en rosal



Deficiencia en pimiento



Deficiencias en melocotonero

- Exceso: Es raro que se presente toxicidad debido a su rápida conversión a compuestos insolubles.

HIERRO en suelo

Origen, contenido y formas

- Muy abundante en la corteza terrestre (5%, tercer elemento tras Si y Al). Aunque la práctica totalidad es inasimilable por las plantas.
- Procede de la degradación de minerales como óxidos (hematita, goetita, magnetita), carbonatos (siderita), sulfuros (pirita) y también hidróxidos, fosfatos y silicatos.
- Los óxidos libres de Fe a menudo son los responsables de la coloración del suelo (amarilla para óxidos más hidratados y roja para los óxidos no hidratados)

HIERRO en suelo

Dinámica

- Respecto a su utilización por la planta, puede estar como:
 - Fe soluble:
 - Fe^{+2} en la solución del suelo en condiciones reductoras.
 - Fe^{+3} con acidez y potencial de oxidación altos.
 - En combinaciones orgánicas formando complejos.
 - Fe insoluble:
 - Hidróxidos y óxidos de Fe (Fe_2O_3) en diferentes estados de hidratación.
 - Como FeO , $\text{Fe}(\text{OH})_2$ o FeCO_3 , en condiciones ácidas reductoras.
 - Como complejos coloidales.

HIERRO en suelo

Dinámica

- Las posibilidades de la planta de utilizar Fe dependen fundamentalmente del pH y la composición mineral y orgánica del suelo.
- Se necesitarían valores de pH muy bajos para una aceptable disponibilidad del Fe (pH 3-3,5), que no los tenemos en suelos agrícolas, pero se pueden generar pHs bajos en las inmediaciones de pelos absorbentes, además de la posible excreción por la raíz de complejantes o quelatantes.
- Buenos contenidos de arcilla y, sobre todo, MO facilitan la disponibilidad del Fe.
- En suelos básicos o se acidifica el suelo (aplicación práctica limitada salvo en fertirrigación) o se añade quelatado (la aplicación de sales ferrosas como SO_4Fe es ineficaz).

HIERRO en suelo

Dinámica

- Quelatos de Fe: Del griego “quelo” que significa “pinza de cangrejo”, permite suprimir las propiedades iónicas del metal, teniendo un compuesto más o menos estable, soluble en agua. Se define como compuesto formado por una molécula orgánica que rodea y se enlaza con un catión metálico por dos o más puntos.

- Agentes quelatantes de Fe:

- Ácidos poliamino carboxílicos: EDTA, HEDTA, DTPA, EDDHA, EDDHMA, EDDHCA.

- Otros: Ácidos orgánicos dicarboxílicos, ácidos disulfónicos, ácidos hidroxicarboxílicos, hidroxioximas, poliflavonoides, Aa, lignosulfonatos, etc.

El pH es el principal factor que condiciona el uso de uno u otro, ya que determina la estabilidad de estos compuestos.

HIERRO en suelo

Dinámica

- También influye sobre su estabilidad el nivel de CO_2 y la presencia de Ca y otros cationes metálicos.
- Fe-EDTA y Fe-HEDTA estable hasta pH 6,5. Fe-EDDHA estable a pH 4-10 (aunque depende del isómero considerado). Fe-DTPA estable hasta pH 7,5.
- Los quelatos de Fe son fotodegradables.
- Al parecer se absorbe el quelato completo, aunque no está claro.
- Atención con el abuso de quelatos de Fe (antagonismo Fe-Mn, con competencia por las mismas localizaciones metabólicas).

MANGANESO en planta

Esencialidad

- Scheele ya comprobó que el Mn era un componente de los vegetales (siglo XVIII). Mucho después, los trabajos de Bertrand y Javillier (inicios siglo XX) proponen su esencialidad, demostrada finalmente por McHarge en 1922.

Contenido y formas

- Se absorbe como Mn^{2+} o como quelatos de Mn.
- En hojas su contenido es de 30-500 ppm sms. En tallos, frutos y raíz su contenido es menor.
- Se moviliza en el interior de la planta como Mn^{+2} no formando complejos como sucede con otros metales.

MANGANESO en planta

Funciones

- Esencial en fotosíntesis (fotólisis del agua).
- Participa en las transformaciones de hexosas fosforiladas, glucólisis y metabolismo de ácidos orgánicos (como Mg, al que puede sustituir en parte).
- Participa en metabolismo de auxinas (inactivación del AIA).
- Participa en el metabolismo del N (enzimas como arginasa, glutamiltransferasa, glutamina sintasa), reducción del nitrato.
- Esencial en síntesis de ácido ascórbico, carotenos y xantofilas.

MANGANESO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Deficiencia:
 - Poco móvil, primeros síntomas en hojas jóvenes.
 - Síntomas: Puntos amarillos entre nervios, que se extienden hasta sólo quedar verdes los nervios y zonas adyacentes. Nivel crítico de deficiencia: 15-20 ppm en hoja.
 - Su absorción y transporte se ve afectado por Ca, Mg, Zn y Fe.
 - Corrección de deficiencia por sales inorgánicas (sulfato) o quelatos o complejos (Mn-EDTA, Mn-DTPA, poliflavonoides, lignosulfonatos)



Deficiencia en pepino

MANGANESO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

Exceso:

- Posibles en suelos ácidos como manchas marrones o negruzcas en hojas adultas. También manchas y puntos necróticos en tallos, pecíolos y nervios de hojas o cortezas con interior necrosado.
- Un exceso de Mn incrementa la actividad de AIA oxidasa, y produce en planta una deficiencia auxínica. La toxicidad se da con niveles superiores a 1000 ppm en hoja.
- Atención como antes al antagonismo Fe-Mn.



Toxicidad en pimiento



Toxicidad en melón



Toxicidad en tomate

MANGANESO en suelo

Origen, contenido y formas

- Proviene de la descomposición de rocas ferromagnéticas. Minerales que contienen Mn: Pirolusita, braunita, hausmanita, manganita.
- Contenidos medios en suelos de 200-300 ppm, aunque muy poco está disponible. Está insoluble a pH y potenciales redox altos y como soluble a pH y potenciales redox bajos.

Dinámica

- Respecto a su disponibilidad tenemos:
 - Mn soluble o activo: Como Mn^{+2} en solución del suelo o adsorbido. También como Mn^{+3} como óxidos $Mn_2O_3 \cdot nH_2O$, fácilmente reducibles a pH neutro.
 - Mn insoluble: Como Mn^{+2-3} (Mn_3O_4) poco activos y no reducibles a pH neutro, aunque sí a pH 2. Como Mn^{+4} , prácticamente inerte para la planta.

MANGANESO en suelo

Dinámica

- Factores que influyen la disponibilidad del Mn:
 - pH y potencial redox del suelo. Disponibilidad elevada en suelos ácidos y encharcados (pudiendo llegar a ser tóxico).
 - MO y actividad microbiana: El Mn se inmoviliza con grandes cantidades de MO y ve disminuido su nivel también por competencia con microorganismos.
 - Presencia de elementos antagónicos (Fe principalmente).

BORO en planta

Esencialidad

- Descubrimiento: Gay Lussac y Thenard (1808)
- Integrante de plantas: Wittstein y Apogier (1857); Jay (1895) B universalmente repartido en todas las plantas
- Mejora de rendimiento de los cultivos: Bertrand (1912), aunque primero se identificó como elemento venenoso
- El boro como elemento esencial: Mazé (1914); Warington (1923); Sommer y Lipman (1926)
- Importancia de su deficiencia en cultivos: Brandenburg (1931), corazón podrido de la remolacha
- Esencialidad en el reino vegetal, no parece ser esencial para hongos y bacterias (salvo cianobacterias) y tampoco para animales. Paralelismo esencialidad y lignificación y diferenciación xilemática.



BORO en planta

Contenido y formas

- Absorción principalmente como H_3BO_3 , de forma pasiva, de forma activa también puede absorberse como anión borato $\text{B}(\text{OH})_4^-$, aunque en menor extensión.
- Movilidad del Boro: Paralelismo al Ca (poco móvil por floema).
- Distribución del Boro en la planta: Acumulación en tejidos más viejos y en puntas y márgenes de hojas (mecanismo de defensa para eviatar toxicidad).
- Síntomas de deficiencia por debajo de 15-20 ppm. Los contenidos normales están en 20-100 ppm y los síntomas de toxicidad a partir de 200 ppm.

BORO en planta

Funciones

- Desconocimiento de sus funciones, no se ha encontrado formando parte de ningún enzima.
- Desarrollo de los tejidos meristemáticos.
- Elongación de raíz y metabolismo de ácidos nucleicos.
- Metabolismo de glúcidos: Migración y utilización de glúcidos, síntesis de sacarosa y almidón.



BORO en planta

Funciones

- Formación de paredes celulares (lignificación): Esencial en síntesis de pectinas y lignina. Papel junto al Ca.
- Metabolismo de fenoles, auxinas y diferenciación de tejidos. Tejidos deficientes en B acumulan AIA que provoca inhibición del crecimiento.
- Procesos de transporte: Ausencia de B induce formación de calosa, que obstruye tubos cribosos afectando el transporte por floema. Interviene en la actividad ATP-asa, fundamental en los procesos de transporte iónico.
- Estabilidad de la membrana celular.



BORO en planta

Funciones

- Absorción y utilización del fósforo: ácidos nucleicos, ATP-asa, fosfolípidos, micorrizas...
- Otras funciones:
 - Tamaño y fertilidad del grano de polen y crecimiento del tubo polínico.
 - Polinización y cuajado de frutos (más néctar menor longitud del tubo de la corola)
 - Resistencia a enfermedades y plagas (leucocianidina) y factores climáticos adversos



BORO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Síntomas de deficiencia externos: inicialmente en las parte jóvenes de la planta:
 - Reducción del crecimiento terminal, con muerte de la yema terminal y estimulación de las axilares. Entrenudos cortos. Forma abotonada o de roseta terminal.
 - Hojas jóvenes deformadas.
 - Pecíolos y tallos más gruesos, fibrosos y frágiles. Apariencia encogida de la planta.
 - Zonas necróticas y acuosas en tejidos de almacenamiento.
 - Aparición de grietas en pecíolos, tallos, frutos y tubérculos.



BORO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Síntomas de deficiencia externos:

- Alteración en la formación de flores y frutos: Frutos deformados.
- Aparición de superficies escamosas y zonas acorchadas
- Alteración en la germinación del polen y formación desuniforme de frutos. Frutos partenocárpicos, pequeños y no comerciales.
- Raíces espesas, más débiles y necrosadas



BORO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Síntomas de deficiencia internos:

- Células deformadas.
- Degeneración de tejidos meristemáticos y membranas celulares.
- Acumulación de compuestos fenólicos.
- Incremento de la actividad ascorbato oxidasa.
- Acumulación de nitratos.
- Aparición de zonas fibrosas.
- Desarrollo anómalo de vasos conductores.
- Disminución del contenido en azúcares.

BORO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Exceso de Boro

- Síntomas de toxicidad, con contenidos ligeramente superiores a los correctos.
- Tolerancia de los cultivos al exceso de Boro.
- Necrosis progresiva de las hojas que comienza por amarilleamiento de ápices y borde, que progresa con quemaduras entre nervios hacia nervadura central.
- Situaciones con riesgo de exceso de Boro: Suelos derivados de sedimentos marinos, suelos de regiones áridas, agua de riego rica en B, abuso de compost urbano.
- Mecanismos de los cultivos contra el exceso de Boro: Acumulación en bordes, por lavado se pierde hasta el 80% del B de las hojas.



Tolerancia relativa de diferentes cultivos al boro presente en el agua de riego, expresado en mg/l

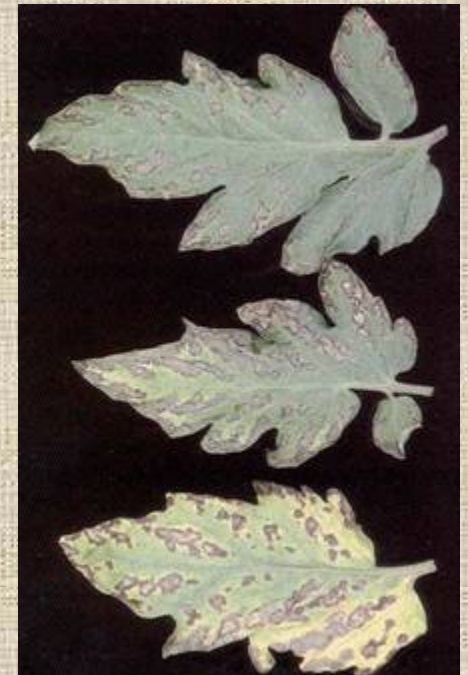
CULTIVOS HORTÍCOLAS	NIVEL CRÍTICO	CULTIVOS FRUTALES	NIVEL CRÍTICO	CULTIVOS EXTENSIVOS	NIVEL CRÍTICO
Zarzamora	0.5	Limonero	0.4	Cacahuete	1.3
Pimiento	1.3	Pomelo	0.5	Avena	1.5
Calabaza	1.4	Aguacate	0.6	Maíz	1.7
Guisante	1.9	Naranja	0.7	Trigo	1.8
Rábano	2.0	Albaricoquero	0.8	Cebada	1.8
Tomate	2.1	Melocotonero	0.8	Girasol	2.5
Patata	2.4	Cerezo	0.8	Tabaco	2.9
Pepino	2.4	Níspero	0.9	Trébol dulce	2.9
Zanahoria	2.5	Caqui	1.0	Sorgo	3.0
Lechuga	2.6	Higuera	1.0	Alfalfa	3.5
Coliflor	2.7	Vid	1.0	Veza	3.5
Col	2.7	Manzano	1.1	Remolacha	3.6
Apio	2.7	Peral	1.1	Algodón	3.8
Nabo	2.8	Nogal	1.1		
Alcachofa	2.8	Ciruelo	1.1		
Melón	2.9	Olivo	1.8		
Cebolla	3.0	Palmera	3.8		
Haba	3.2				
Espárrago	4.0				

Interpretación del nivel de boro asimilable en suelo

B soluble en agua hirviendo	B en extracto saturado	Interpretación
< 0.2 ppm	< 0.2 ppm	Muy bajo
0.2-0.5 ppm	0.2-0.7 ppm	Bajo
0.5-3 ppm	0.7-1.5 ppm	Normal
> 3 ppm	> 1.5 ppm	Excesivo (tóxico)

Diagnóstico en cultivos de interés

- Tomate
 - Deficiencia: < 15 ppm
 - Tratamiento: 1-1,5 Kg/Ha B
 - Foliar: 0,05% B
 - Normalidad: 30-100 ppm
 - Toxicidad: >200 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés



Diagnóstico en cultivos de interés

- Pepino

- Deficiencia: < 20 ppm
- Tratamiento: 1-2 Kg/Ha B
- Foliar: 0,05% B
- Normalidad: 30-100 ppm
- Toxicidad: >300 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés

- Pimiento
 - Deficiencia: < 20 ppm
 - Tratamiento: 1-2 Kg/Ha B
 - Foliar: 0,05% B
 - Normalidad: 30-100 ppm
 - Toxicidad: >500 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés

- Melón
 - Deficiencia: < 25 ppm
 - Tratamiento: 1-1,5 Kg/Ha B
 - Foliar: 0,05% B
 - Normalidad: 30-80 ppm
 - Toxicidad: >800 ppm



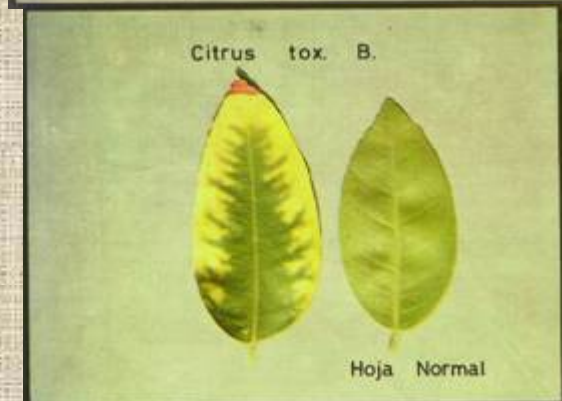
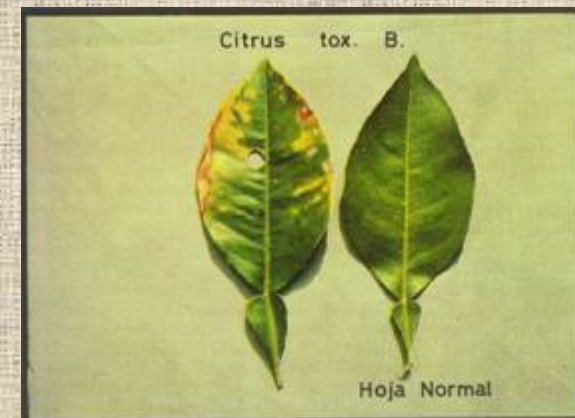
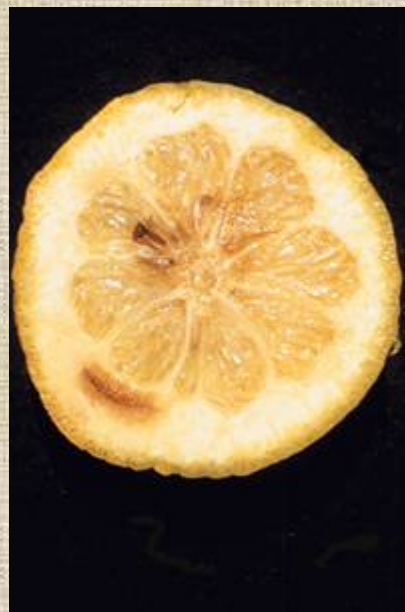
Diagnóstico en cultivos de interés

- Cítricos

- Deficiencia: < 20 ppm
- Tratamiento: 15-30 g/árbol B

Foliar: 0,05% B fuera de floración

- Normalidad: 30-100 ppm
- Toxicidad: >250 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés

- Frutales

- Deficiencia: < 20 ppm
- Tratamiento: 15-50 g/árbol B
- Foliar: 0,05% B
- Normalidad: 25-60 ppm
- Toxicidad: >100 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés

- Aguacate
 - Deficiencia: < 15 ppm
 - Tratamiento: 10-30 g/árbol B
Foliar: 0,05% B
 - Normalidad: 35-100 ppm
 - Toxicidad: >250 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés

- Vid
 - Deficiencia: < 25 ppm
 - Tratamiento: 3-10 Kg/Ha B
 - Foliar: 0,05% B
 - Normalidad: 30-70 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés

- Vid

Toxicidad: >150 ppm



Diagnóstico en cultivos de interés

- Clavel

- Deficiencia: < 20 ppm
- Tratamiento: 1-2 Kg/Ha B
Foliar: 0,03% B
- Normalidad: 30-100 ppm
- Toxicidad: >700 ppm



BORO en suelo

Origen, contenido

- Predominio en rocas sedimentarias, debido a que se encuentra en cantidades elevadas en el agua de mar.
- El B total en el suelo varía de 2-200 ppm, la mayor parte no asimilable, la cantidad de B asimilable generalmente es inferior al 5% del total.
- Componente habitual de minerales del grupo de la turmalina, granitos y otras rocas eruptivas muy resistentes a la meteorización.
- El B asimilable para las plantas coincide con el soluble en agua caliente.

BORO en suelo

Formas y dinámica

- 4 Formas de Boro en el suelo:
 - Integrando minerales silicatados: Inasimilable.
 - En la disolución del suelo.
 - Adsorbido por arcillas e hidróxidos, con máxima adsorción a pH 8-9.
 - Ligado a la materia orgánica.
- En la disolución del suelo está como H_3BO_3 o como anión borato $B(OH)_4^-$. Predomina la primera forma, que es fácilmente lavable, sobre todo a $pH < 7$. El anión borato aumenta su presencia a pH alcalino y queda adsorbida.
- En zonas húmedas se lava, en zonas áridas puede acumularse incluso hasta toxicidad en capas superficiales.

BORO en suelo

Dinámica

- Niveles críticos:
 - 1 ppm en suelos calizos; 0,8 ppm en suelos arcillosos; 0,5 ppm en suelos francos; 0,3 ppm en suelos arenosos.
 - Nivel de toxicidad por encima de 5 ppm.
- Corrección de deficiencia, abonos para aporte de B:
 - Bórax: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
 - Tetraborato sódico: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ o $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 - Pentaborato sódico: $\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
 - Solubor: $\text{Na}_2\text{B}_8\text{O}_{13} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
 - Ácido bórico: H_3BO_3
 - Colemanita: $\text{Ca}_2\text{B}_7\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

BORO en suelo

Dinámica

- Factores que afectan la disponibilidad del B:
 - Reservas de B en el suelo: bajas en suelos arenosos y pobres en MO.
 - pH del suelo: Disminuye la disponibilidad al aumentar el pH.
 - Humedad del suelo: Fácilmente lavable sobre todo sobre todo en suelos ácidos y arenosos. Períodos prolongados de sequía favorecen su fijación.
 - Interacciones con otros elementos: Grandes abonados de N atenúan su exceso o inducen su deficiencia. Sinérgico con P, K, Ca y Mg en cantidades de éstos no excesivas. Elevadas concentraciones de Ca y K inducen su deficiencia.

CINC en planta

Esencialidad

- Raulin (1869) fue el primero en sugerir su esencialidad. A comienzos del siglo XX, Mazé y Javillier lo recomiendan como mejorador de cosechas. La demostración definitiva de su esencialidad corresponde a Sommer y Lipman (1926).

Contenido y formas

- Se absorbe como Zn^{2+} o como quelatos de Zn. También puede absorberse como Zn^+ por encima de pH 7,7.
- Elemento poco móvil en el interior de la planta.
- Contenidos medios entre 20-100 ppm sms.

CINC en planta

Funciones

- Consisten fundamentalmente en su participación en sistemas enzimáticos. Papel esencial en:
 - Biosíntesis de auxinas (imprescindible en la síntesis de Trp).
 - Metabolismo nitrogenado: Enzima deshidrogenasa glutámica, síntesis de proteínas y ARN.
 - Glucólisis y transformación de hexosas fosforiladas: Enzimas aldolasa y enolasa.
 - Activación de los enzimas deshidrogenasa málica (ciclo de Krebs), anhidrasa carbónica, superóxido dismutasa, etc.

CINC en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- La deficiencia de Zn (folioclrosis) inicia en hojas jóvenes.
- Amarilleamiento intervenal progresivo, disminución del tamaño de la hoja. Entrenudos cortos, malformación de brotes y hojas.
- A veces reciben denominaciones características: Enfermedad del brote blanco (white bud) en maíz y sorgo, hoja moteada en cítricos, hojas en hoz (sickle leaf) en cacao, etc.
- Elevados contenidos de Fe, Mn, Cu, N y P, pueden inducir su deficiencia.
- Corrección por aportes de sales inorgánicas (sulfatos), quelatos (Zn-EDTA, Zn-DTPA) o complejos con poliflavonoides y lignosulfonatos. La estabilidad de estos compuestos depende del pH y la presencia de Ca, P, Fe y Mn.

CINC en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso



Deficiencias en
naranja



Deficiencias en
tomate

- Exceso: Es raro, puede darse en suelos ácidos o cercanos a minas de cinc. Interfiere en la asimilación del Fe.
- Toxicidad con valores por encima de 400 ppm, a veces muestra tonos rojizos en los pecíolos de las hojas.

CINC en suelo

Origen, contenido y formas

- Proviene de la descomposición de minerales como silicatos (willemita, hemimorfita), sulfuros (esfalerita, blenda), óxidos (cincita), carbonatos (smithsonita).
- Contenidos medios en suelos de 10-300 ppm, aunque muy poco está disponible, generalmente siempre menos de 10 ppm.

Dinámica

- Tiende a quedar adsorbido en arcillas y MO, por lo que no es fácilmente lixiviable y se acumula en horizontes superficiales del suelo.
- En el suelo, además del completamente inasimilable integrando la composición de minerales, lo podemos tener como Zn soluble en la solución del suelo, adsorbido a coloides o fijado en la red cristalina de arcillas.

CINC en suelo

Dinámica

- Factores que influyen esta dinámica:
 - pH del suelo: A $\text{pH} < 5$, Zn muy disponible pero sujeto a fuerte lixiviación, $\text{pH} 5-7$, descende su solubilidad al formar hidróxidos. En suelos básicos: disponibilidad muy baja en suelos calizos o mayor si la alcalinidad es debida al sodio (suelos sódicos).
 - Textura y composición del suelo: La deficiencia aumenta en suelos arenosos y ricos en P.
 - Temperatura del suelos: La absorción de Zn fuertemente disminuida en suelos fríos.

COBRE en planta

Esencialidad

- Sommer (1931) fue el primero en proponerlo como elemento esencial y la demostración definitiva se debe a Lipman y McKinney (1932).

Contenido y formas

- Se absorbe como Cu^{2+} o como quelatos de Cu.
- Se transporta en el interior de la planta unido a Aa.
- Contenidos medios bajos entre 2-30 ppm sms. Las semillas contienen bastante cobre y en hojas está fundamentalmente en mitocondrias y cloroplastos.
- No es muy móvil, aunque algo más que el resto de micronutrientes metálicos.

COBRE en planta

Funciones

- Consisten fundamentalmente en su participación en sistemas enzimáticos, por su capacidad redox (como Fe). Esencial en los enzimas oxidasa:

- Fenolasa y laccasa (lignificación).

- Ácido aspártico oxidasa (respiración mitocondrial).

- Diamina oxidasa (síntesis de alcaloides y auxinas), citocromo oxidasa (cadena de transporte e⁻ en mitocondrias), superóxido dismutasa (fotorrespiración), plastocianina (cadena de transporte de e⁻), ascórbico oxidasa, etc.

- Participa en metabolismo nitrogenado (síntesis de ácidos nucleicos, fijación), metabolismo glucídico, transpiración, etc.

COBRE en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- La deficiencia de Cu inicia en hojas jóvenes.
- Deformación y muerte de hojas jóvenes, aparecen previamente color verde oscuro y marchitas. Entrenudos cortos, hojas curvadas hacia abajo y nervaduras que sobresalen.
- Corrección por aportes de sales inorgánicas (sulfatos) o quelatos (Cu-EDTA). La estabilidad de estos compuestos depende del pH y la presencia de Ca, Mg, Fe, Mn y Zn.



Deficiencia en rosal



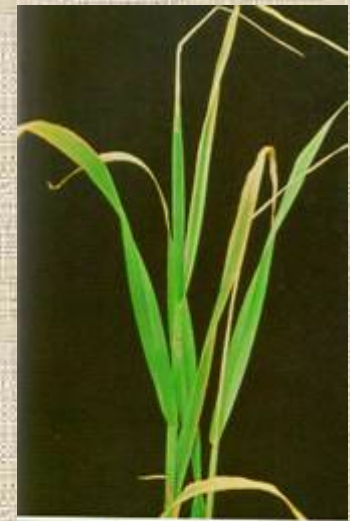
Deficiencia en crisantemo

COBRE en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso



Deficiencia en trigo,
maduración retrasada
y tintes rojizos a verde opacos



• Exceso: Principalmente en raíz, causando daños en la membrana plasmática. Raíces pierden vigor, color oscuro y engrosan. Casi siempre viene asociada a deficiencia de Fe y/o P.

Buen nivel de Ca, contribuyen a disminuir la toxicidad por Cu.

COBRE en suelo

Origen, contenido y formas

- Descomposición de minerales como sulfuros (calcosita, calcopirita, covelita), óxidos (cuprita, tenorita), carbonatos (malaquita, azurita).
- Contenidos medios en suelos de 5-50 ppm, aunque poco está disponible.

Dinámica

- Tiende a quedar muy fuertemente adsorbido a la superficie de los coloides, lo que limita su movilidad en el suelo.
- Los principales factores que controlan su disponibilidad son:
 - MO: Lo fija formando complejos húmico-cúpricos de diferente estabilidad, lo que determina su disponibilidad.
 - pH: Disminuye la disponibilidad al aumentar el pH.
 - Interacciones: Antagonismos con P, N, Al, Fe, Zn y Mo.

MOLIBDENO en planta

Esencialidad

- Tras un trabajo previo de Bortels, en 1923 Hoagland y Snyder inician el establecimiento de su esencialidad, que queda totalmente confirmada por Arnon y Stout (1939).

Contenido y formas

- Se absorbe como MoO_4^{2-} .
- Necesidades muy bajas, aunque los contenidos son muy variables 0,1-300 ppm sms, lo normal es un rango de 1-10 ppm sms.
- Generalmente las raíces tienen contenidos mayores que hojas, tallos y semillas.

MOLIBDENO en planta

Funciones

- Es constituyente esencial de los enzimas nitrogenasa (fijación del N_2) y nitrato reductasa (reducción del nitrato).
- También interviene en el metabolismo de P, S (sulfato reductasa), ácido ascórbico y clorofila.

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Síntomas de deficiencia siempre correlacionados con el metabolismo del N.
- Clorosis en hojas adultas, aunque a veces aparece en hojas nuevas. A veces aparecen manchas amarillas circulares o elípticas, que pueden necrosarse y desprenderse generando agujeros (yellow spot).

MOLIBDENO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Hojas que no forman el limbo (hoja en forma de “cola de látigo” “whiptail” de la coliflor), deformaciones en hoja aún con color verde.
- Se acumulan nitratos, que incluso pueden llegar a ser tóxicos necrosándose el tejido, con escasez de Aa.
- Deficiencia en suelos ácidos (precipita como molibdato férrico) y muy rara en suelos alcalinos. Se corrige con aporte de Molibdato amónico o sódico, aumentando el pH del suelo (encalado).



Deficiencia en melón



Deficiencia en cítricos



Deficiencia en crisantemo

MOLIBDENO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso



Deficiencia en clavel



Deficiencia en rosa



Deficiencias en coliflor, retorcimiento de hojas tiernas ("corazón retorcido"), tendencia a no formación de corona, limbo limitado y a veces ausente hasta la nerviadura central ("punta de látigo")

• Exceso: La fitotoxicidad es muy rara, aunque contenidos excesivos en pastos sí pueden causar trastornos al ganado (suelos alcalinos con mal drenaje).

MOLIBDENO en suelo

Origen, contenido y formas

- Procede de la descomposición rocas. Minerales que lo contienen molibdenita, wulfenita, powelillita, ferromolibdita...
- Contenidos medios muy bajos 2-2,5 ppm.

Dinámica

- La mayor parte del Mo del suelo no es disponible, sólo alrededor del 10% está disponible y se corresponde con el presente en la solución del suelo.
- Los principales factores que controlan su disponibilidad son:
 - pH: Más disponible al aumentar el pH.
 - Contenidos en óxidos de Fe y Al (que lo pueden adsorber, más fuertemente conforme baja el pH).
 - MO: Debido a que puede suministrar Mo más que a la fijación de éste.

MOLIBDENO en suelo

Dinámica

- Humedad del suelo: Se acentúa la deficiencia en condiciones de sequedad, mientras que los encharcamientos aumentan su disponibilidad.
- P y S: Grandes cantidades de fosfatos aumentan su disponibilidad, mientras que grandes cantidades de sulfatos la reducen.
- Elevados contenidos de Fe, Mn y Cu, limitan su absorción.

CLORO en planta

Esencialidad

- Casi último elemento aceptado como esencial por toda la comunidad científica. Ya en 1862 Nobbe y Siegert, señalaron dificultad en la maduración de las plantas de trigo en ausencia total de cloruros. En 1942 Eaton señala que la presencia de cloruros incrementa rendimientos de algodón y tomate. Es en 1954 cuando Broyer, Carlton, Johnson y Stout publican un trabajo en el que queda confirmada la esencialidad del Cl.

Contenido y formas

- Se absorbe como Cl^- tanto por raíz como foliarmente. Bajo esta forma está en planta y es muy móvil.
- Los requerimientos fisiológicos son muy bajos (unas 5 ppm), aunque con frecuencia está en planta en contenidos mucho mayores (0,2-2% o más en halofitas).

CLORO en planta

Funciones

- Su principal función está en el proceso de fotólisis del agua.
- También favorece la turgencia de la planta, regula la apertura estomática, activa algunas enzimas, neutraliza cationes e interviene en el transporte de K.

Alteraciones por deficiencia y exceso

- La deficiencia en condiciones de campo no se observa, se ha podido provocar con SN manteniendo concentraciones inferiores a 2 ppm en el medio.
- Aparece un marchitamiento de la planta y clorosis foliar.

CLORO en planta

Alteraciones por deficiencia y exceso

- Exceso: Es frecuente y grave, dependiendo de la tolerancia de la especie.
- Síntomas: Adelgazamiento de hojas que tienden a enrollarse con quemaduras y necrosis en ápice y bordes, que se extiende hasta caída de hojas.
- Puede confundirse con la deficiencia de K.



CLORO en suelo

Origen, contenido y formas

- Se encuentra en el suelo en cantidades muy variables (0-1000 kg/Ha), en función de la presencia de sales solubles principalmente NaCl y también Cl_2Ca y Cl_2Mg . En suelos cercanos al mar, puede rebasarse ampliamente este límite.
- Todos los suelos tienen suficiente cantidad para completar la demanda de la planta, procediendo de la degradación de rocas, de restos orgánicos o por deposiciones de lluvias y vientos procedentes de zonas costeras.

Dinámica

- Muy soluble, apenas se fija a coloides y se lava con facilidad. Puede acumularse en superficie en zonas áridas e invernaderos.
- Elevados contenidos de Cl^- dificultan la absorción de NO_3^- .

NÍQUEL

- Recientemente ha sido propuesto como esencial, aún hay controversia sobre si es plenamente aceptado. Parece ser esencial en el metabolismo de la urea (funcionamiento del enzima ureasa).
- Concentraciones inferiores a 0,1 ppm pueden manifestar síntomas de deficiencia parecidos a los del Fe en determinados cultivos (cebada).

ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Sodio en planta

- No está aceptado como esencial para todas las plantas, sí aceptado como estimulante y sustituto parcial de K.
- Absorbido como Na^+ . Contenidos medios en planta sobre 1200 ppm sms.
- Incrementa rendimientos particularmente en situaciones de deficiencia de K. Si el aporte de K es correcto su adición en general disminuye rendimientos.
- Mantiene el potencial osmótico celular (más turgencia y retraso de marchitamiento), disminuye los daños por heladas (menor punto de congelación de savia), favorece color y aroma de frutas y hortalizas.
- Frecuentemente está en exceso causando necrosis y quemaduras en cultivos.

ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS



Sodio en suelo

- Es muy lixiviable y en zonas áridas puede acumularse y mantener niveles en el complejo de cambio que pueden dañar la estructura del suelo. Así tenemos tres tipos de suelos:

ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Sodio en suelo

- Suelos salinos: Elevada proporción de sales solubles aunque el Na de cambio < 15%. El pH < 8,5. Se acumulan costras blancas superficiales por exceso de sales (álcali blanco). Suelos recuperables con lavado y buen drenaje.
- Suelos salino-sódicos: Elevada proporción de sales solubles pero el Na de cambio > 15%. El pH raramente es > 8,5. El exceso de sales solubles neutras actúa de freno.
- Suelos sódicos: No hay exceso de sales solubles neutras y el Na de cambio > 15%. El pH es > 8,5. El Na adsorbido se hidroliza incrementando el pH:



ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Sodio en suelo

- Suelos sódicos

Se ve aumentada la degradación de la estructura por dispersión de coloides y la toxicidad por Na^+ .

El pH puede llegar incluso a 10, por la hidrólisis anterior y por la hidrólisis del Na_2CO_3 :



A este valor de pH la MO dispersa y se distribuye en superficie de partículas (álcali negro). Suelos de difícil y lenta recuperación (control del Na de cambio, incorporación de Ca, lavado, MO fácilmente degradable, especies resistentes a salinidad, etc.).

ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Silicio

- Está en planta de forma constante y en notable proporción, pero no es admitido como esencial por toda la comunidad científica. Sí lo es para el arroz.



ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Silicio

- Se absorbe como ácido silícico H_4SiO_4 . Su solubilidad es baja (2 mM por encima polimeriza como gel coloidal). Contenidos en material vegetal de 0,15-1% sms. Con la edad del tejido aumentan los niveles al depositarse sílice sólida.
- Puede sustituir parcialmente a P y B. Favorece la asimilación de P e influye en la transpiración de la planta.
- Aumenta la tolerancia a excesos (Mn y Fe en suelos ácidos) y salinidad.
- Incrementa la resistencia mecánica, reforzando paredes celulares y espesor de piel de fruta, corteza y tallos, lo que da resistencia a hongos, sequía, insectos, frío, etc. Es exudado cristalizado en hoja y frutos, lo que resulta irritante para insectos

ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Cobalto

- Considerado esencial por algunos investigadores, pero no hay acuerdo total.
- Contenido bajo en plantas (0,02-0,5 ppm sms). Esencial para leguminosas ya que se necesita en la síntesis de leghemoglobina.
- En suelo fuertemente adsorbido al complejo coloidal, lo que limita su disponibilidad.
- Su contenido en pastos es importante al ser componente de vitamina B₁₂.

ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Vanadio

- Se encuentra en plantas en concentración sobre 1 ppm. Involucrado en el proceso de fijación del N, reemplazando de forma parcial a Mo.

Aluminio

- Reduce la toxicidad de exceso de Cu, Mn y P. Aunque en suelos ácidos (pH<6) puede resultar tóxico.

ELEMENTOS ESENCIALES PARA ALGUNAS PLANTA Y BENEFICIOSOS

Aluminio

Toxicidad por aluminio en raíces y hojas de píceas

