

FERTILIDAD DEL SUELO Y NUTRICION MINERAL DE PLANTAS -Conceptos Básicos-

**Ing. Javier Sánchez V.
FERTITEC S.A.**

PARTE I: FERTILIDAD DEL SUELO.

1. EL CONCEPTO DE SUELO:

Hay muchos conceptos de suelo dependiendo del ángulo y enfoque que se le da al mismo. Sin embargo, resumiendo todos ellos podemos llegar al siguiente: *“Suelo: Es un ente natural, tridimensional, trifásico, dinámico, sobre el cual crecen y se desarrollan la mayoría de las plantas”.*

Es un ente, porque tiene vida; tridimensional, porque es visto a lo largo, ancho y profundidad; trifásico, porque existe fase sólida, líquida y gaseosa; dinámico, porque dentro del suelo ocurren procesos que involucran cambios físicos y reacciones químicas constantemente. Además es el medio natural donde crecen las plantas, por tanto sirve como soporte.

2. FERTILIDAD DEL SUELO.

La Fertilidad del Suelo es una cualidad resultante de la interacción entre las características físicas, químicas y biológicas del mismo y que consiste en la capacidad de poder suministrar condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

En lo referente al suministro de condiciones óptimas para el asentamiento de las plantas, estas características no actúan independientemente, sino en armónica interrelación, que en conjunto determinan la fertilidad del suelo. Por ejemplo, un suelo puede estar provisto de suficientes elementos minerales -fertilidad química- pero que no está provisto de buenas condiciones físicas y viceversa.

Igualmente, la fertilidad del suelo no es suficiente para el crecimiento de las plantas; el clima juega un papel importante y determinante en muchos casos. Por ejemplo se puede tener un suelo fértil y que dadas las temperaturas extremas no es capaz de producir buenas cosechas, entonces en un suelo fértil, no productivo.

Respecto a su constitución, en general y en promedio, en VOLUMEN, una proporción ideal está dada por 45-48% de partículas minerales, 5-2% de materia orgánica, 25% de aire y 25% de agua.

3. PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO.

- a. **Textura:** El término textura, se refiere la proporción de arena, limo y arcilla expresados en porcentaje.

En la fracción mineral del suelo, son de interés edafológico solamente las partículas menores de 2mm de diámetro. A las partículas mayores de 2 mm de diámetro se les denomina “modificadores texturales”, dentro de este concepto también se incluyen los carbonatos, la materia orgánica, las sales en exceso, etc., consecuentemente:

$$\% \text{ arena} + \% \text{ limo} + \% \text{ arcilla} = 100\%$$

La textura es una propiedad física primaria y guarda relación con otras, como por ejemplo:

- La permeabilidad
- La capacidad retentiva del agua
- La porosidad
- La aireación
- Las densidades real y aparente
- Capacidad de intercambio catiónico
- La estructura

Existen diversos sistemas de clasificación de las partículas minerales de acuerdo a su tamaño. El más definido y aceptado es el sistema USDA, que agrupa a las partículas de la siguiente manera:

Arena muy gruesa	1 - 2 mm
Arena gruesa	0.5 - 1 mm
Arena media	0.25 - 0.5 mm
Arena fina	0.1 - 0.25 mm
Arena muy fina	0.05 - 0.1 mm
Limo	0.002-0.05 mm
Arcilla	< 0.002 mm

De acuerdo a las diferentes proporciones de arena, limo y arcilla, los suelos son agrupados en clases texturales. Una clase textural, es el nombre con que se designa a un suelo de acuerdo a la fracción o fracciones predominantes. El sistema contempla 12 clases texturales:

- | | | |
|-----------|--------------------|-------------------------|
| - Arena | -Arena franca | -Franco arcillo limoso |
| - Limo | - Franco arenoso | -Franco arcillo arenoso |
| - Arcilla | - Franco arcilloso | -Arcillo limoso |
| - Franco | - Franco limoso | -Arcillo arenoso |

- b. **Estructura:** Es la manera como se agrupan las partículas de arena, limo y arcilla, para formar agregados, NO debe confundirse “agregado” con “terron”. El terrón es el resultado de las operaciones de labranza y no guarda la estabilidad que corresponde a un agregado.

El factor cementante de los agregados del suelo lo constituyen la materia orgánica y la arcilla básicamente. Del mismo modo, el Ca favorece mucho a la

agregación, mientras que el Na tiene un efecto dispersante. La Estructura se juzga por:

- Tipo o Forma del agregado:
 - Laminar
 - Prismática
 - Columnar
 - Bloque cúbico angular
 - Bloque cúbico subangular
 - Granular
 - Migajosa
 -

- Clase o Tamaño:

Tamaño o clase	Diámetro gránulos	Espesor de lámina	Diámetro bloques	Altura de prisma
Muy fino	< 1 mm	< 1 mm	< 5 mm	<10 mm
Fino	1 – 2 mm	1 – 2 mm	5 – 10 mm	10 – 20 mm
Medio	2 – 5 mm	2 – 5 mm	10 – 20 mm	20 – 50 mm
Grueso	5 – 10 mm	5 – 10 mm	20 – 50 mm	50 – 100 mm
Muy grueso	> 10 mm	> 10 mm	> 50 mm	> 100 mm

- Grado o Claridad:
 - Sin estructura: carente de agregación
 - Débil: agregados escasamente visibles
 - Moderada: agregados fácilmente observables
 - Fuertes: agregados prominentes y visibles.

c. **Densidad Aparente y Densidad Real:** La densidad aparente (DA) y la densidad real (DR) se expresan así:

$$DA = Ms/Vt$$

$$DR = Ms/Vs$$

Donde:

Ms = masa o peso de sólidos

Vs = volumen de sólidos

Vt = volumen total

La composición mineral es más o menos constante en la mayoría de los suelos, por tanto se estima que la DR varía entre 2.6 a 2.7g/cc para todos los suelos. En tanto que la DA depende del grado de soltura o porosidad del suelo, es un valor más variable que depende además de la textura, el contenido de materia orgánica y la estructura.

La densidad real DR, mide el grado de compactación de un determinado suelo cuando éste ha sido sometido a trabajos constantes de maquinaria pesada sobre la capa arable, pudiendo mostrarse esa compactación en esa misma capa o en la subyacente.

Así, podemos asumir los siguientes valores promedio para cada grupo de suelos:

Clase Textural	Densidad Aparente	% Porosidad
Arenoso	1.6 - 1.8	30 - 35
Fco. Arenoso	1.4 - 1.3	35 - 40
Franco	1.3 - 1.4	40 - 45
Fco. Limoso	1.2 - 1.3	45 - 50
Arcilloso	1.0 - 1.2	50 - 60

Por lo expuesto, se desprende que la DR es un valor estable (en tanto no se puede modificar el volumen de los sólidos), en tanto que la DA es más variable (debido a la inestabilidad de la soltura de los suelos). Así, un suelos recién preparado para la siembra tendrá valores de DA más bajos, en tanto que el mismo suelo después de la cosecha, mostrará altos valores de DA, sobre todo si ha sido sometido a procesos de cultivo con maquinaria pesada.

- d. **Porosidad:** La porosidad, no es otra cosa que el porcentaje de espacios vacíos (o poros) con respecto del volumen total del suelo (volumen de sólidos + volumen de poros). A su vez, la porosidad incluye macroporosidad (poros grandes donde se ubica el aire) y la microporosidad (poros pequeños, que definen los capilares donde se retiene el agua).

Cuadro 1: Distribución de diferentes poros en suelos de tres clases texturales:

Suelo	Porosidad	Microporosidad	Macroporosidad
Textura	(% total)	%	%
Arenoso	37	3	34
Franco	50	27	23
Arcilloso	53	44	9

Consecuentemente podemos deducir que los suelos arenosos tienen excelente capacidad de aireación, pero mínima capacidad de retención de agua. En el extremo, los suelos arcillosos, retienen gran cantidad de agua, pero muestran deficiente aireación.

- e. **Coefficientes Hídricos:** Los suelos tienen diferente capacidad de retener y habilitar agua para las plantas. Estos valores se expresan a través de los coeficientes hídricos: Capacidad de campo y Punto de Marchitez.
- La Capacidad de Campo: es la máxima capacidad de agua que el suelo puede retener, es decir el agua que está retenida a 1/3 de atm de tensión y que no está sujeta a la acción de la gravedad. En términos prácticos, para un suelo franco, sería la cantidad de agua que tiene el suelo al segundo o tercer día después de un riego pesado o una lluvia intensa. Aproximadamente el óptimo de humedad para iniciar la preparación del terreno, después del riego de “machaco”.
 - El Punto de Marchitez: Es más bien un término fisiológico, que corresponde al contenido de humedad del suelo, donde la mayoría de las plantas, no compensan la absorción radicular con la evapotranspiración, mostrando síntomas de marchitez permanente. En este punto, el agua es retenida por el suelo a una tensión de 15 atm.

- Agua Disponible y Agua Aprovechable: Agua disponible es la cantidad de agua que existe como diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez; mientras que, agua aprovechable es aproximadamente el 75% del agua disponible.

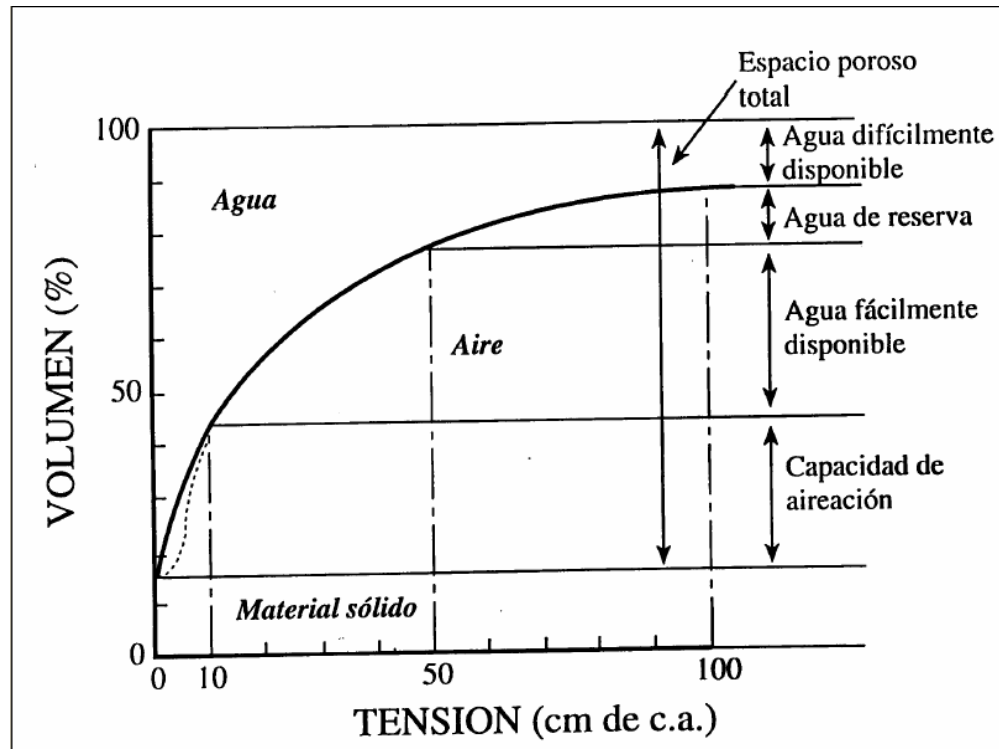


Figura 1: Curvas de Retención de Humedad del Suelo

Cuadro 2: Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitez (PM) y Agua Disponible (AD) en suelos de diferentes clases texturales.

Textura	Punto de Marchitez		Capacidad de Campo		Agua Disponible	
	%	cm	%	cm	%	cm
Arena media	1.7	0.78	6.8	3.1	5.1	2.3
Arena fina	2.3	1.1	8.5	3.8	6.2	2.8
Franco arenoso	3.4	1.5	11.3	5.1	7.9	3.6
Franco	6.8	3.1	18.1	8.1	11.3	5.1
Fco. Arcilloso	10.2	4.6	21.5	9.7	11.3	5.1
Arcilloso	14.7	6.6	22.6	10.2	7.9	3.6

Por otro lado, en cada especie de planta, las raíces pueden variar de forma y posición, siendo por tanto algunas desde muy superficiales hasta muy profundas o de un patrón de expansión más lateral que vertical, lo que implica diferente volumen de exploración de suelo por agua y nutrientes.

4. PROPIEDADES QUIMICAS DEL SUELO.

- a. **Reacción del suelo (pH):** Es una propiedad que tiene influencia indirecta en los procesos químicos, disponibilidad de nutrientes, procesos biológicos y actividad microbiana.

Es definido como el logaritmo inverso de la actividad de iones hidrógeno en la solución suelo. Normalmente el rango de pH de los suelos varía entre 3.5 a 9.0, la razón por la que no se alcanza valores extremos de 0 ó 14 se debe a que la solución suelos no es una solución verdadera, sino una solución coloidal.

A la mayoría de especies cultivadas, les favorece pH entre valores de 5.5 a 7.5, pero cada especie y variedad tiene un rango específico donde se desarrolla mejor. Normalmente entre pH 6.5 y 7.0 es el rango que se maneja especialmente para cultivos bajo técnicas de fertirrigación.

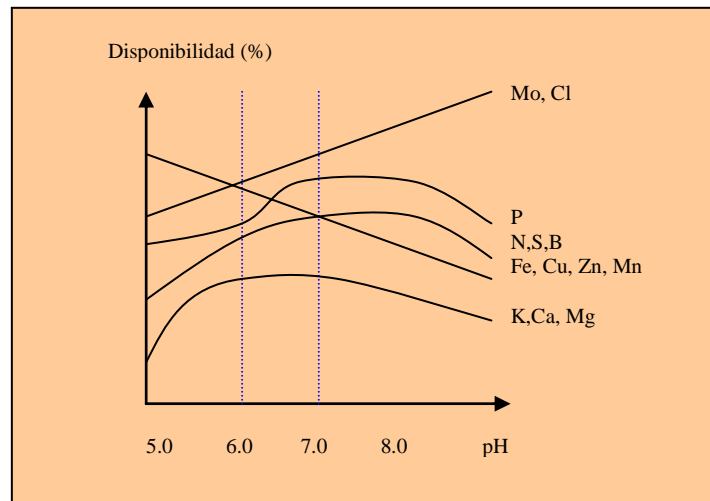


Figura 2: El pH y la disponibilidad de nutrientes en el suelo

Cuadro 3: Relación de algunos cultivos y el pH óptimo para su desarrollo

Cultivo	Rango pH	Cultivo	Rango pH
Alfalfa	6.2 - 7.8	Espárragos	6.2 - 7.8
Col	5.5 - 7.2	Zanahoria	5.7 - 7.0
Melón	5.6 - 7.3	Pimiento	5.2 - 6.8
Tomate	5.2 - 6.7	Maíz	6.0 - 7.0
Papa	5.0 - 7.0	Cebolla	6.0 - 7.4
Manzano	5.1 - 6.8	Vid	6.0 - 7.5
Arroz	5.0 - 6.5	Arvejas	6.0 - 7.5
Cana azúcar	5.5 - 8.0	Pina	5.0 - 6.0

Los suelos de pH fuertemente ácidos, no son recomendables por la gran cantidad de aluminio y la disminución de la actividad microbiana. Los suelos alcalinos,

originan una escasa disponibilidad de elementos menores, excepto molibdeno, mostrando una marcada deficiencia.

- b. **Las Arcillas del Suelo:** La fracción mineral de los suelos lo constituyen las arcillas. Si bien desde el punto de vista de su tamaño, adoptan ese nombre las partículas < 2 mm de diámetro, es mucho más trascendente el comportamiento coloidal que exhiben, es decir la capacidad de mostrar cargas negativas en donde se absorben los cationes que constituyen la posibilidad de reserva de nutrientes. Otra característica es su estructura cristalina, la que toma como referencia para su clasificación.

En cuanto a su origen, las arcillas se derivan de minerales primarios como feldspatos, micas, minerales ferromagnesianos, de allí su nombre de minerales secundarios. La mayoría de arcillas tienen estructura cristalina, es decir, poseen una ordenación repetida de los átomos de que están compuestos. Láminas tetraedrales de silicio y láminas octaedrales de Al se superponen en disposición plana para formar capas.

Por diversas razones las arcillas exhiben cargas negativas netas, que le permite atraer y retener cationes como Ca, Mg, K, Na, H, Al, NH_4^+ , etc., la magnitud de esa carga negativa se expresa en meq/100g de suelo.

- La Montmorrillonita: Es una arcilla tipo 2:1, lo que indica 2 láminas tetraédricas de Sílice y una lámina octaédrica de Aluminio al medio de aquellas para formar una capa. Son arcillas adhesivas y expansibles. En esta arcilla, el agua penetra fácilmente entre las capas originando su expansión. Es común en suelos escasamente lavados, como en las regiones áridas, los pobremente drenados y/o desarrollados de rocas alcalinas como la caliza.
- La Illita: Es una arcilla tipo 2:1 como la montmorrillonita. La alta cantidad de K entre capas adyacentes (en cavidades exagonales, le impide penetrar el agua, por lo que tiene moderada expansión. Dado su estructura es similar a los minerales micáceos, se asume que deriva de éstas pérdidas y/o alteración parcial de K.
- La Vermiculita: Es una arcilla tipo 2:1, pero tiene capas más débilmente unidas por magnesio hidratado (en vez de K): por ello es que la vermiculita tiene más expansión que la illita, pero no tanto como la montmorrillonita; igualmente exhibe una alta capacidad de intercambio catiónico.
- La Clorita: Es una arcilla tipo 2:2, similar a la vermiculita pero el Mg hidratado (Brucita) prácticamente se constituye en una lámina octaedral.
- La Caolinita. Es una arcilla tipo 1:1, común en suelos ácidos intemperizados, casi no se ha producido sustitución de Al^{3+} por Si^{3+} en las láminas tetraedrales o Mg^{2+} por Al^{3+} en las láminas octaedrales, por lo que la carga negativa es muy baja. Sin embargo, cada capa tiene un plano de Oxígeno reemplazado por oxidrilos (OH^-) que originan un fuerte enlace hidrógeno entre las capas de oxígenos, lo que le impide penetrar al agua y por tanto, no son expandibles.

- c. **El Complejo Arcillo-Húmico:** El comportamiento coloidal no es exclusivo de las arcillas. Esta propiedad es compartida con el humus. Las arcillas y el humus, forman un todo único, por lo que se denomina Complejo Arcillo Húmico, Complejo de Cambio, etc.

El Humus, el coloide orgánico resultante de la descomposición temporal de los residuos orgánicos en el suelo. Por su estructura, el humus es amorfo (no cristalino) de naturaleza ligno-proteica, elevado peso molecular, de color más o menos oscuro, poco soluble en el agua, de alta CIC, siendo la fracción más estable de la materia orgánica.

- d. **Capacidad de Intercambio Catiónico:** Es una propiedad química que designa los procesos de: (a) Adsorción de cationes por el complejo de cambio desde la solución suelo y (b) Liberación de cationes desde el complejo de cambio hacia la solución suelo.

Esta propiedad es atribuida a la arcilla (coloide mineral) y al humus (coloide orgánico), de manera que la CIC, está influenciada por:

- La cantidad y tipo de arcilla
- La cantidad de humus
- El pH o reacción del suelo

Cuadro 4: Capacidad de Cambio de algunas arcillas y del Humus.

Tipo de Colide (arcillas y humus)	CIC meq/100g
1:1 Caolinita	3 - 15
Haloisita	5 - 10
2:1 Montmorrillonita	80 - 120
Vermiculita	100-150
Ilita	20 - 50
2:2 Clorita	10 - 40
Humus	100-300
Sesquióxidos	< 3

5. PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL SUELO.

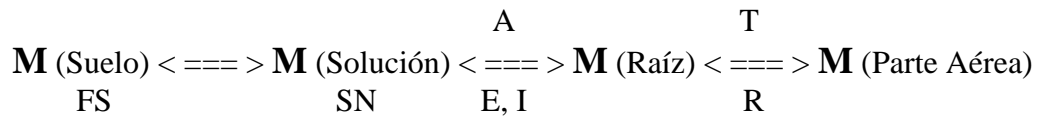
La cantidad de materia orgánica (MO), está ligada a la cantidad, tipo y actividad microbiana. De este modo el mantenimiento de la “fertilidad biológica” sugiere inalterabilidad del ambiente sobre todo microbiológico del suelo. Son variadas las ventajas y actividades de los microorganismos del suelo, participando en:

- Procesos de humificación y mineralización de la materia orgánica.
- Procesos de fijación biológica de N (simbiótica y libre).
- Solubilización de componentes minerales del suelo (asociación micorrítica).
- Reducción de Nitratos y Sulfatos.
- Hidrólisis de la urea.

PARTE II: NUTRICION MINERAL DE PLANTAS

1. LA NUTRICION Y EL SISTEMA SUELO-PLANTA.

Es un sistema abierto en que los elementos (M) son constantemente removidos de un lado (fase sólida) a otro donde es acumulado (planta).



Donde:

FS = Fase Sólida; constituida por la materia orgánica y la fracción mineral. Ocurren reacciones de: disponibilidad, desorción, mineralización de la materia orgánica.

SN= Solución; compartimiento para la absorción radicular. Ocurren reacciones de absorción, fijación e inmovilización.

A = Absorción

E = Excreción

I = Inmovilización

T = Transporte

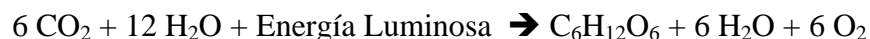
R = Redistribución

Características del sistema:

- Es abierto:** Por tanto se dan todas las reacciones posibles.
- Estado estable:** Todas las reacciones parciales ocurren con la misma velocidad de izquierda a derecha y viceversa y la concentración de M no varía ($dM/dt = 0$)
- La velocidad** de las reacciones es determinada por aquella que es menor. El elemento M puede ser: esencial, benéfico o tóxico.

Dentro de este aspecto es relevante mencionar que se admiten tres formas de nutrición de plantas.

- Nutrición carbonada, a través de la incorporación y transformación del CO_2 en carbohidratos en el proceso fotosintético.



- Nutrición mineral, a través de la absorción radicular de nutrientes en forma aniónicas y catiónicas simples.
- Nutrición hídrica, es la absorción de agua para la fotosíntesis y con ella la absorción de minerales.

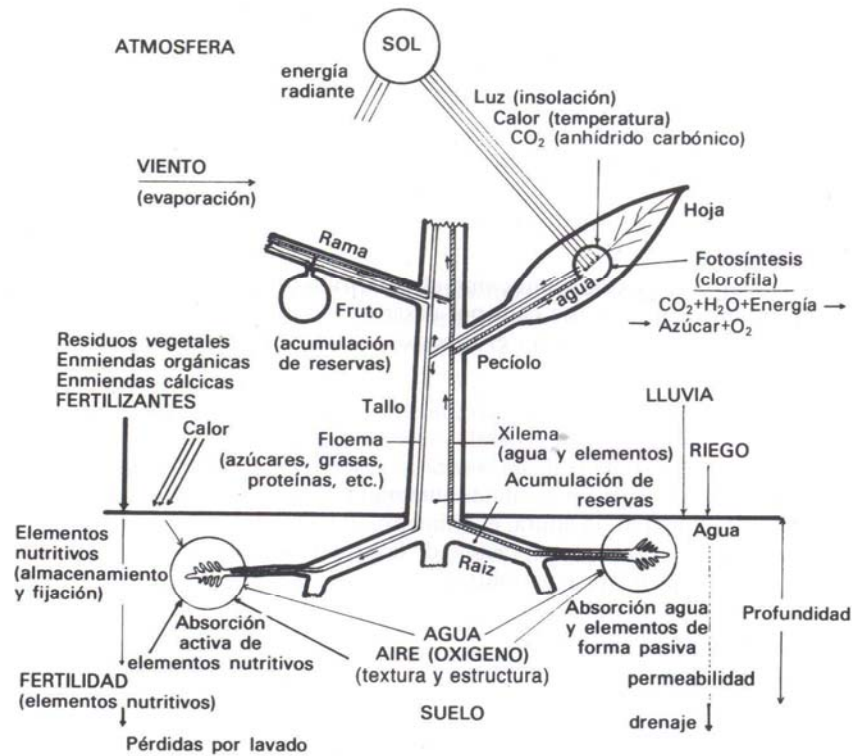


Figura 3: Esquema simplificado de los factores que intervienen en la nutrición de las plantas (tomado de Domínguez, 1997)

2. ORIGEN DE LOS NUTRIENTES.

- a. **Reservas naturales del suelo:** Composición del suelo, elementos disponibles y cambiables (las arcillas y la materia orgánica, son la fuente de reserva del suelos por ser de naturaleza coloidal) y de las condiciones meteorológicas.
- b. **Fertilizantes** minerales, una amplia gama de abonos simples y compuestos y, micronutrientes quelatados y complejados y en menor medida los fertilizantes orgánicos (aminoácidos y hormonas).
- c. **El agua de riego.** Gran cantidad de agua circula por las plantas (uso consuntivo) aportando principalmente elementos como calcio, magnesio, potasio, nitratos, sulfatos y boro.
- d. **Fuentes orgánicas.** Descomposición y mineralización de residuos vegetales y animales del suelo. Estos pueden ser naturales (reciclaje) o incorporados.
- e. **Precipitación** (lluvia). Especialmente nitrógeno. El agua de lluvia puede captar y llevar el nitrógeno atmosférico hacia la tierra e incorporarse al sistema suelo-planta.
- f. **Microorganismos:** Fijación biológica (nitrógeno), micorrizas (fósforo), reacciones óxido reductoras de los elementos.

3. FUNCIONES CELULARES DE LOS ELEMENTOS NUTRITIVOS.

a. Constituyentes de Moléculas Orgánicas.

- **Nitrógenos (N):** Forman parte de la estructura de aminoácidos y proteínas, bases nitrogenadas y ácidos nucleicos, enzimas y coenzimas, vitaminas, glicolípidos y lipoproteínas, pigmentos. Constituyente y activador de todas las enzimas. Interviene en procesos de absorción iónica, fotosíntesis, respiración, síntesis, multiplicación y diferenciación celular, herencia.
- **Azufre (S):** Forma parte estructural de los aminoácidos (cisteína, cistina, metionina, taurina), todas las proteínas, vitaminas y coenzimas, ésteres con polisacáridos. Constituyente del grupo sulfhidrilo y ditiol, activo en enzimas y coenzimas, ferredoxinas. Interviene en los procesos de fotosíntesis, fijación de CO₂, respiración, síntesis de grasas y proteínas, fijación simbiótica de nitrógeno.

b. Reserva Energética.

- **Fósforo (P):** Forma parte estructural de ésteres de carbohidratos, fosfolípidos, coenzimas, ácidos nucleicos. Interviene en los procesos de almacenamiento y transferencia de energía, fijación simbiótica de nitrógeno y en otros procesos con el nitrógeno.
- **Boro (B):** Forma parte estructural de complejos difenólicos, carbohidratos y azúcares-P. Constituyente de la ATPase de membranas celulares, $ATP=ADP+P$, $UDPG + R = UDP + R - G$. Interviene en los procesos de síntesis de ácidos nucleicos y proteínas.

c. Forma Iónica.

- **Potasio (K):** Predominantemente iónica. Constituyente de quinasa pirúvica, síntesis de glutatión, síntesis de succinil CoA, síntesis de glutamilmisteína, síntesis de NAD⁺, deshidrogenasa aldehído, etc. Interviene en procesos osmóticos, apertura y cierre de estomas, fotosíntesis y transporte de carbohidratos, respiración, fijación simbiótica de nitrógeno, etc.
- **Magnesio (Mg):** Forma parte estructural de la clorofila. Constituyente de tioquinasa acética, quinasa pirúvica, hexoquinasa, enolasa, piruvato decarboxilasa, etc. Interviene en los procesos de absorción iónica, fotosíntesis, respiración, almacenamiento y transferencia de energía, balance electrolítico, estabilidad de los ribosomas, etc.
- **Calcio (Ca):** Forma parte estructural de los pectatos (lámina media), carbonatos, oxalatos, fitatos, calmodulinas. Constituyente de ATPasa (aspirasa), alfa amilasa, fosfolipasa D, nucleasa. Interviene en los procesos de estructura y

funcionamiento de las membranas, absorción iónica, reacciones con hormonas vegetales y activación enzimática.

- **Cloro (Cl):** Forma parte estructural de la acutumina y acutumidina, etc. Activador de la fotólisis del agua. Interviene en los procesos de la fotosíntesis.

d. **Reacciones Redox.**

- **Hierro (Fe):** Forma parte estructural de los quelatos y fitoferritina. Constituyente de heme peroxidasa, catalasa, citocromos, hemoglobina, reductasa del sulfito, oxidasa de sulfito, ferredoxina, nitrogenasa, hidrogenasa, etc. Interviene en los procesos de fotosíntesis, respiración, fijación biológica de nitrógeno, asimilación de nitrógeno y de azufre.
- **Manganeso (Mn):** Forma parte estructural de la manganina. Constituyente de síntesis del glutanione, activación de metionina, quinasa pirúvica, enolasa, carboxilasa pirúvica, pirofosforilasa, enzima málica, etc. Interviene en los procesos de absorción iónica, fotosíntesis, respiración, control hormonal y síntesis de proteínas.
- **Cobre (Cu):** Forma parte estructural de las proteínas. Constituyente de ascorbato oxidasa, polifenol oxidasa, cresolasa, tirosinasa, plastocianina, citocromo oxidasa etc. Interviene en los procesos de fotosíntesis, respiración, regulación hormonal, fijación de nitrógeno, metabolismo de compuestos secundarios, etc.
- **Molibdeno (Mo):** No es estructural. Constituyente de la nitrato reductasa, nitrogenasa, Interviene en la reducción del nitrato, fijación de nitrógeno, síntesis de proteína.
- **Zinc (Zn):** No es estructural. Constituyente de anhidrasa carbónica, dehidrogenasa láctica, dehidrogenasa alcohólica, aldolasa, dehidrogenasa glutámica carboxilasa pirúvica, ribonucleasa, etc. Interviene en los procesos de respiración, control hormonal y síntesis de proteínas.
- **Niquel (Ni):** No es estructural. Constituyente de la ureasa. Interviene en procesos de metabolismo del nitrógeno.
- **Sodio (Na):** Interviene en los procesos de control hormonal (citoquininas) en plantas C4.

4. **ELEMENTOS ESCENCIALES:**

a. **Criterios de Esencialidad.**

- La deficiencia del elemento M, impide que la planta complete sus ciclo vital.
- El elemento M debe participar directamente en el metabolismo de la planta.
- El elemento M, no debe ser reemplazado por otro que tiene propiedades similares.

b. Clasificación de los Elementos Esenciales.

- **Macronutrientes Primarios:**
N=NO₃⁻ y NH₄⁺; P=H₂PO₄⁻ y HPO₄²⁻; K=K⁺;
- **Macronutrientes Secundarios:**
Ca=Ca²⁺; Mg=Mg²⁺; S=SO₄²⁻
- **Micronutrientes:**
Fe=Fe²⁺; Mn=Mn²⁺; Cu=Cu²⁺; Zn=Zn²⁺; Cl=Cl⁻; B=H₃BO₃;
Mo=MoO₄²⁻.

Cuadro 5: Elementos esenciales, símbolo, formas de absorción y composición aproximada en las plantas.

Elemento	Sim	Forma de Absorción	% en la Planta
Carbono	C	CO ₂	40 – 50
Oxígeno	O	O ₂ y H ₂ O	42 - 44
Hidrógeno	H	H ₂ y H ₂ O	6 – 7
Nitrógeno	N	NO ₃ ⁻ y NH ₄ ⁺	1 – 3
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ y HPO ₄ ²⁻	0.05 -1
Potasio	K	K ⁺	0.3 – 3
Calcio	Ca	Ca ²⁺	0.5 – 3.5
Magnesio	Mg	Mg ²⁺	0.03 – 0.8
Azufre	S	SO ₄ ²⁻	0.1 – 0.5
Fierro	Fe	Fe ²⁺	100 – 1000ppm
Manganeso	Mn	Mn ²⁺	50 – 300ppm
Cobre	Cu	Cu ²⁺	10 – 40ppm
Zinc	Zn	Zn ²⁺	10 – 20
Boro	B	H ₂ BO ₃ ⁻	50 – 300ppm
Molibdeno	Mo	MoO ₄ ²⁻	10 – 40 ppm
Cloro	Cl	Cl ⁻	
Sodio	Na	Na ⁺	

5. MOVIMIENTOS DE LOS IONES DEL SUELO A LA RAÍZ.

- a. **Flujo de masas:** Consiste en el movimiento del elemento de una fase acuosa (solución) de una región más húmeda, distante de la raíz, hacia otra más seca (próxima a la superficie radicular). La cantidad que puede entrar en ese proceso es:

$$Q_{fm} = [M] \cdot V$$

Donde:

[M] = Concentración del elemento en la solución.

V = Volumen de agua absorbida por el cultivo.

- b. **Difusión:** El elemento camina distancias cortas en una fase acuosa estacionaria, yendo de una mayor concentración a una menor concentración en la superficie de la raíz, obedece a la ley de Fick.

$$F = - D \cdot dc/dx$$

Donde:

F = Velocidad de difusión

dc/dx = gradiente de concentración

c = Concentración

x = Distancia

D = Coeficiente de Difusión

Por ejemplo:

$$\text{NO}_3^- = -0.3 \times 1.3 \times 10^{-5}$$

$$\text{NH}_4^+ = -1.4 \times 10^{-6}$$

$$\text{H}_2\text{PO}_4^- = -10^{-7} - 10^{-14}$$

$$\text{K}^+ = -10^{-8} - 10^{-12}$$

- c. **Intercepción Radicular:** Las raíces interceptan a los iones al crecer en la zona donde están los nutrientes en la solución y luego son absorbidos.

$$\text{Area de raíces/Area de Suelo} = 2 \times 10^{-5}$$

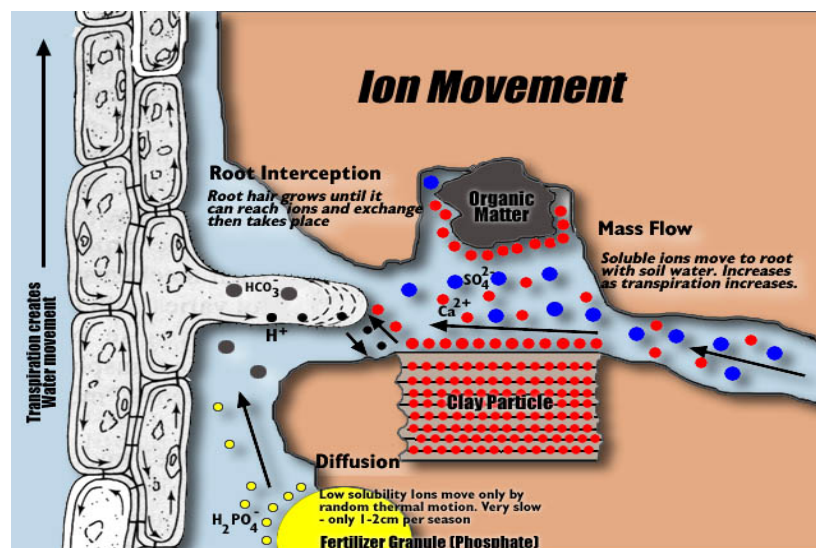


Figura 4: Movimiento de iones a la raíz (tomado de Haifa, 2003)

6. LA ABSORCIÓN IÓNICA (AI).

- a. **Activa (=Metabólica):** Corresponde a un segmento donde M atraviesa una barrera lípida del plasmolema hasta el tonoplasto, para esto necesita gastar energía en la respiración. El mecanismo o mecanismos para la absorción activa no está totalmente explicado, lo que se sabe al respecto

es que: (a) El transporte activo consiste en una operación de una bomba iónica (en sentido hidráulico) y (b) una enzima ATPasa, localizada en el plasmolema activada por cationes con diferentes especificidades, bombeando H^+ hacia fuera del citoplasma. Tiene las siguientes características:

- Se da con la célula viva
 - Ligada a la respiración
 - Requiere energía
 - No es espontánea
 - Aeróbica
 - Influye a los inhibidores
 - Temperaturas fisiológicas.
- b. **Pasiva** (= Físico-Química): El elemento entra sin que la célula necesite gastar energía, desplazándose de una región de mayor concentración a una de menor concentración. Con esta absorción se da el 15% del total absorbido. Tiene las siguientes características:
- Se da en células vivas o no
 - Independiente de la respiración
 - No requiere energía
 - Aeróbico y anaeróbico
 - No influyen los inhibidores
 - Cualquier temperatura
- c. **Principios de la Absorción de Solutos.**
- Muchos solutos se acumulan en el interior de las células. Razón de acumulación: exterior [-], interior [+].
 - La absorción de solutos es específica y selectiva. Absorción de K^+ es selectivo a pesar que Na^+ es semejante.
 - Los solutos absorbidos a menudo salen con lentitud, eso indica que la absorción es unidireccional sobre todo.
 - La rapidez de absorción de solutos varía con la concentración, velocidad de absorción vs. concentración. En plantas cultivadas eso significa frecuencia de aplicación.

7. TRANSPORTE Y REDISTRIBUCION DE IONES.

- a. **Transporte:** Movimiento de M de un lugar de residencia (órgano) para otro. Ejemplo: de una hoja vieja para una hoja nueva, de una hoja a un órgano de reserva o de una hoja para el fruto.
- Transporte en la raíz: Es la ruta que siguen los nutrientes para pasar desde la epidermis hasta el cilindro central (floema y xilema): Solución → Epidermis → Parénquima cortical → Endodermis → Cilindro central (floema y xilema). Este mecanismo puede seguir dos rutas: (A) *Apoplástica*, a través de la red de paredes hasta la banda de Caspary y (B) *Simplástica*, dentro del Citosol de las células hasta el Xilema (fig. 5).
 - Transporte a largas distancia: Significa el camino del M desde la raíz hasta la parte aérea. El transporte a larga distancia ocurre en el xilema, empero para algunos elementos como el potasio ocurre en el floema. Ocurre aproximadamente así:

Solución suelo → Espacio libre aparente → Citoplasma → Simplasto → Xilema → Parte aérea.

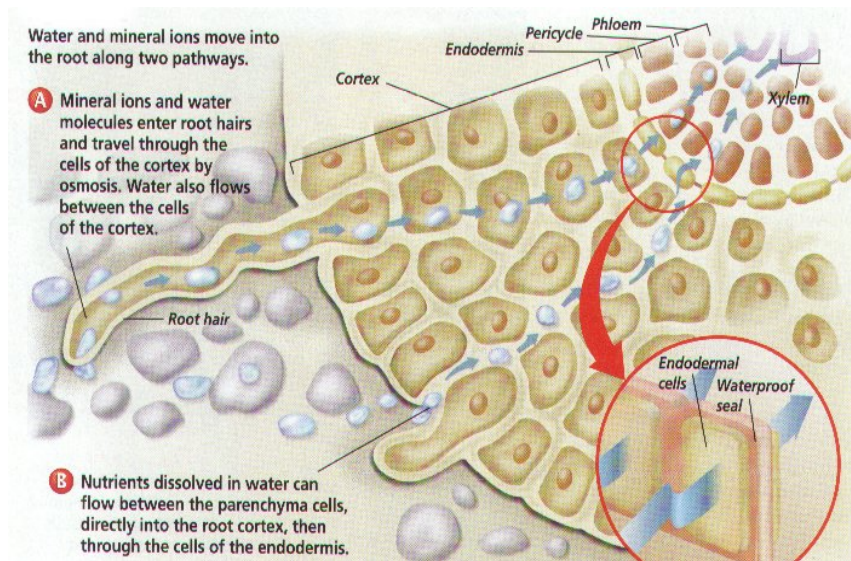


Figura 5: Movimiento Apoplástico (A) y Simplástico (B), (tomado de Haifa, 2003)

- b. **Redistribución:** Se hace predominantemente por el floema, los elementos pueden demostrar movilidad fluida muy diferente. Esa movilidad mayor o menor tiene relevancia práctica:
- Ocurre disminución del suministro (Transferencia del suelo => Solución suelo => Raíz) aparecen síntomas de carencia. *Elementos móviles*, en hojas viejas, *elementos poco móviles*, en las hojas viejas generalmente, *elementos inmóviles*, hojas y órganos más nuevos.

Cuadro 6: Movilidad de los elementos nutritivos.

Muy Móvil	Móvil	Semi Móvil	Inmóvil
Nitrogeno (N)	Fósforo (P)	Zinc (Zn)	Boro (B)
Potasio (K)	Cloro (Cl)	Cobre (Cu)	Magnesio (Mg)
Sodio (Na)	Azufre (S)	Manganeso (Mn)	Calcio (Ca)
		Hierro (Fe)	
		Molibdeno (Mo)	

- Un cultivo exige suplemento continuo de elementos poco móviles e inmóviles, para que no haya interrupción o disminución del suministro, por tanto, no habrá movilización suficiente para “socorrer” a los órganos más jóvenes.

8. FACTORES QUE AFECTAN LA ABSORCIÓN IÓNICA.

a. Externos:

- Disponibilidad: La raíz absorbe M de la solución suelo, para lo cual debe haber existido primero una transferencia de la fase

sólida a la solución. Eso depende de varios factores: Humedad, a mayor humedad mayor solución; Aireación, los microorganismos que transforman la materia orgánica, necesitan oxígeno, por otro lado puede disminuir la disponibilidad de fierro; materia orgánica, ayuda a mantener la disponibilidad de fosfatos al igual que calcio, magnesio y potasio; pH, tal vez sea el mayor factor de influencia en la disponibilidad, ya que se ha demostrado que entre valores 6.0 a 6.5 existe la mayor disponibilidad de la mayoría de nutrientes.

- Temperatura: En la banda entre 0 y 30°C la absorción crece de manera lineal.
- Elemento: Los elementos son absorbidos con velocidades diferentes, en general obedeciendo al siguiente orden decreciente: Aniones : $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_2\text{PO}_4^-$ y Cationes: $\text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
- Otros iones: La solución suelo, es una población altamente heterogénea de iones que contienen elementos esenciales, benéficos y tóxicos, lo cual está en función del incremento o disminución de la concentración.

b. Internos:

- Potencial Genético: El proceso de absorción iónica, como en casi toda la vida de la planta, está controlada genéticamente. Existen diferentes capacidades de velocidad de absorción entre especies y aún entre variedades.
- Estado iónico interno: La capacidad de una raíz para absorber M es limitada, una célula no es “un saco sin fondo”, en consecuencia, las plantas ligeramente deficientes pueden acumular más que las plantas bien suplidas del elemento.
- Nivel de carbohidratos: Los carbohidratos respirables son una fuente común de energía para los procesos de absorción, dentro de los límites, será mayor cuánto más alta sea la concentración de carbohidratos.
- Intensidad respiratoria: El efecto de la transpiración es indirecto, la corriente transpiratoria que en el xilema conduce a M hacia la parte aérea, puede aumentar una tensión, empujando al elemento contenido en los espacios intercelulares a la pared celular de la raíz. Habiendo mayor transpiración hay mayor flujo de masas.
- Morfología de la raíz: Las plantas con raíces más desarrolladas, más finas, bien distribuídas, con mayor cantidad de pelos absorbentes, absorben más, especialmente cuyo contacto con la raíz es por difusión.

9. INTERACCION IONICA.

- a. Antagonismos: Un Elemento reduce el efecto tóxico del otro.
- b. Sinergismos: Un Elemento favorece la absorción de otro.

- c. Inhibición:
- > Competitiva, cuando tienen el mismo transportador.
 - > No Competitiva, la presencia del ión inhibe al otro.

Cuadro 7: Interacciones más comunes (Malavolta, 1989).

Interacción	Elementos	Elementos
Competitiva	MoO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
Competitiva	Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Cu ²⁺
Competitiva	Fe ²⁺	Mn ²⁺
Competitiva	Mg ²⁺	K ⁺
No Competitiva	Ca ²⁺	Mg ²⁺ (a veces)
No Competitiva	Zn ²⁺	H ₂ PO ₄ ⁻
Competitiva	SO ₄ ²⁻	SeO ₄ ²⁻
Competitiva	Cl ⁻	Br

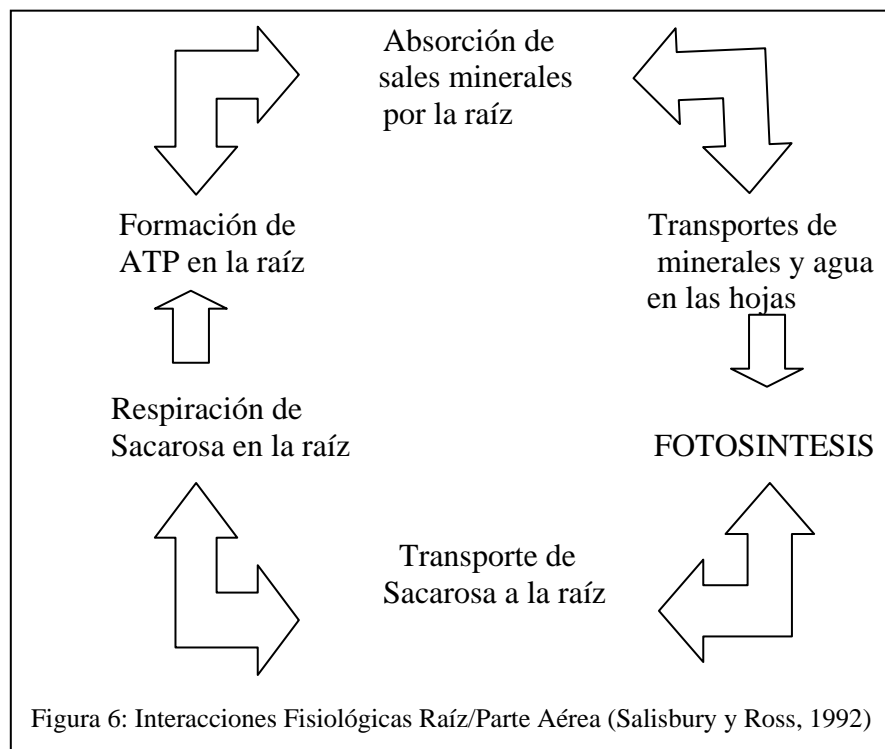
Cuadro 8: Sinergismos y Antagonismos más Importantes (Burt, et al, 1998)

Asimilación del Nutriente	Antagonismo con Elemento	Sinergismos con Elemento
NH ₄ ⁺	Mg, Ca, K, Mo	Mn, P, S, Cl
NO ₃ ⁻	Fe, Cu, Cl	Ca, Mg, K, Mo
P	Cu, Zn	Mo
K	Ca, Mg	Mn (suelos ácidos)
Ca		Mn (suelos básicos)
Mg	Ca, K	Mo
Fe	Cu, Zn	K
Zn	Cu, P	
Cu	Zn, Mo, P	
Mn	Zn, Ca, Mo	
Mo	Cu, Mn	

10. INTERACCIONES FISIOLÓGICAS RAÍZ/PARTE AEREA.

La absorción de sales minerales debe estar controlada por los procesos de la parte aérea (Fig. 6).

- a. **En el sentido de la Demanda:** La parte aérea puede incrementar la absorción de sales minerales en la raíz haciendo un uso rápido de dichas sales para destinarlos a productos de crecimiento (proteínas, ácidos nucleicos y clorofila por ejemplo).
- b. **En el sentido del Aporte:** La parte aérea aporta carbohidratos, por medio del floema, que la raíz debe respirar para producir ATP que se necesita para la absorción de sales minerales. Es probable que la parte aérea proporcione a la raíz hormonas que influyen en la absorción radical.



LITERATURA CONSULTADA.

Domínguez, V.A. (1997) Tratado de Fertilización. 3ra. Edición. Mundi Prensa. Madrid. 613 pag.

Fassbender, H.W. and E. Boernemiza (1987) Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. 5ta. Reimpresión. San José. 420 pag.

Malavolta, E., G.C. Vitti e S.A. de Oliveira (1989). Avalicáo do Estado Nutricional das Plantas. Principios y Aplicacões. Potafos, SP. 2001pag.

Salisbury, B.F. y C.W.Ross (1992) Fisiología Vegetal. Editorial Iberoamericana. México. 759 pag.

Tisdale, S.L., W.L. Nelson, J.D. Beaton and J.L. Havlin (1993). Soil Fertility and Fertilizers. Fifth Edition. Ed. Mc. Millan. Ontario. 634p.

JSV-GG-FT
Enero/2007