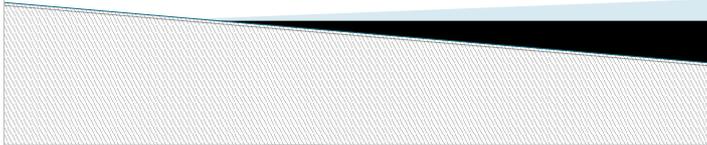


PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

Juan Pablo Fuentes Espoz Ph.D.

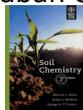


La evolución de la química del suelo

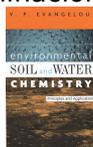
- ▶ La química del suelo es una subdisciplina de las ciencias del suelo que se originó en 1850 en Inglaterra.
- ▶ J. Thomas Way en ese entonces descubrió que los suelos podían adsorber cationes y aniones y que estos iones se podían intercambiar con otros iones.
- ▶ También descubrió que las arcillas eran un componente importante en la adsorción.



- ▶ El énfasis inicial de la química del suelo estaba en determinar cómo las reacciones químicas afectaban el crecimiento de las plantas.

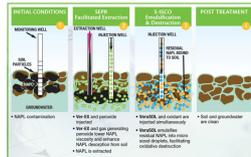
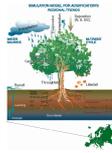


- ▶ Hoy en día ese foco se ha expandido notablemente a aspectos de contaminación y medioambiente.



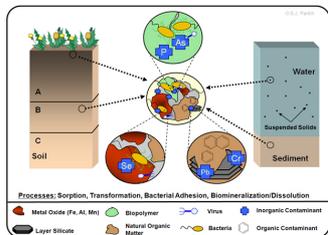
Algunos ejemplos

- ▶ Contaminación de aguas y suelos
 - ▢ Contaminación de aguas
 - ▢ Fuentes de contaminación para Nitratos y fosfatos
 - ▢ Pesticidas
 - ▢ Depositación ácida
 - ▢ Metales traza
 - ▢ Residuos o basuras peligrosas



¿Qué veremos nosotros?

- ▶ Analizaremos las propiedades químicas básicas que tienen relación con crecimiento vegetal y aspectos ambientales.



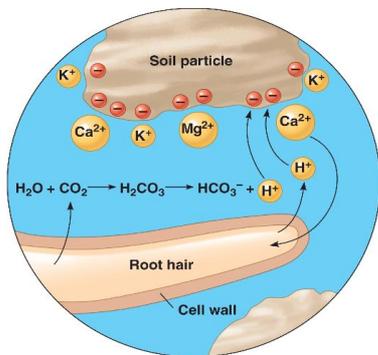
Propiedades generalmente analizadas

- ▶ El fenómeno de retención de iones y moléculas en los suelos:
 - Capacidad de intercambio catiónico CIC
 - Capacidad de intercambio aniónico
- ▶ Acidez del suelo
- ▶ Salinidad del suelo
- ▶ El movimiento de iones a las raíces

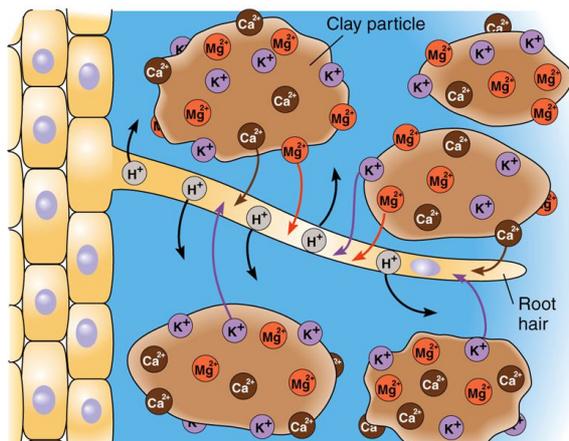
La retención de iones y moléculas

- ▶ Este tópico ya lo hemos analizado en detalle (interacción fases líquidas y gaseosas del suelo)!!!
- ▶ Para recordar:
- ▶ La Capacidad de intercambio Cationes:
 - Corresponde a la suma total de cationes intercambiables que una cantidad determinada de suelo (1 kg en seco) puede adsorber. Se expresa en centimoles de carga por kilogramo de suelo (cmolc/kg)

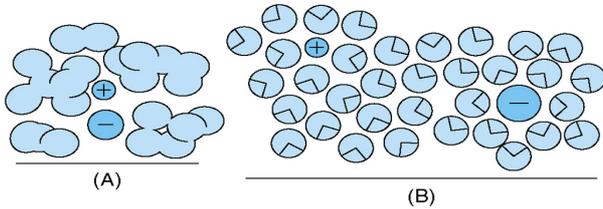
El intercambio iónico en el suelo



Cation exchange

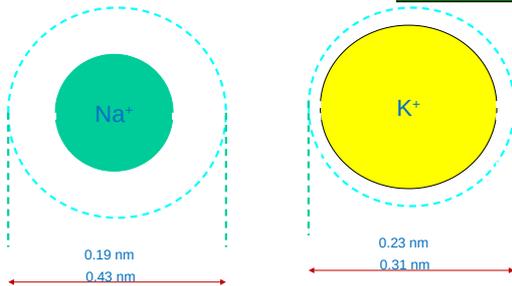


Hidratación de los iones. (A) Iones en un solvente no polar están libres y forman un sólido. (B) Iones en agua (solvente polar) se hidratan orientando las moléculas de agua en capas o películas de hidratación. Las sustancias iónicas son más solubles en solventes polares que en solventes no polares.



Capa de hidratación menor en K que en Na

Densidad de carga superficial
 $\frac{\text{carga}}{\text{superficie}}$

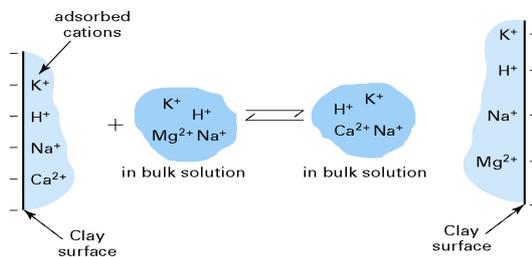


Los elementos más fácilmente lixiviables son las sales (carbonatos, cloruros, sulfatos, nitratos, bicarbonatos).

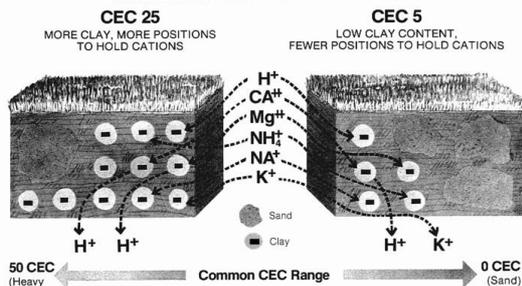
Velocidad relativa o facilidad de remoción por lixiviación

- Al₂O₃ Óxido de aluminio
- Fe₂O₃ Óxido de hierro (óxido ferroso)
- SiO₂ Cuarzo
- K⁺
- Mg²⁺
- Na⁺
- Ca²⁺
- SO₄²⁻
- Cl⁻

Cation exchange occurs when a loosely held cation in soil solution very near a charged surface changes places with a cation from the bulk soil solution. Here a Mg^{2+} in the bulk solution is exchanged with a Ca^{2+} at the clay surface. The reaction is reversible.

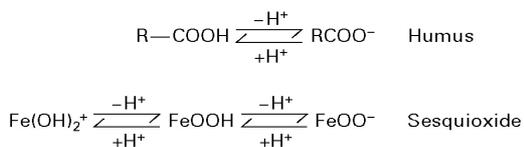


A SCHEMATIC LOOK AT CATION EXCHANGE



SOME PRACTICAL APPLICATIONS	
Soils with CEC 11-50 Range	Soils with CEC 1-10 Range
<ul style="list-style-type: none"> • High clay content • More time required to correct a given pH • Greater capacity to hold nutrients in a given soil depth • Physical ramifications of a soil with a high clay content • High water-holding capacity 	<ul style="list-style-type: none"> • High sand content • Nitrogen and potassium leaching more likely • Less lime required to correct a given pH • Physical ramifications of a soil with a high sand content • Low water-holding capacity

The charge on some humus particles and on nonsilicate clays is often determined by the pH of the soil solution. On the left side of these equations is the protonated species, and on the right is the deprotonated species. Deprotonation results in a net negative charge. Protonation adds an extra H^+ to the particle, reducing the negative charge or creating a net positive charge.



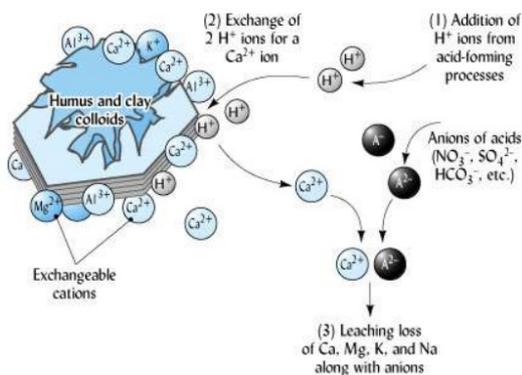
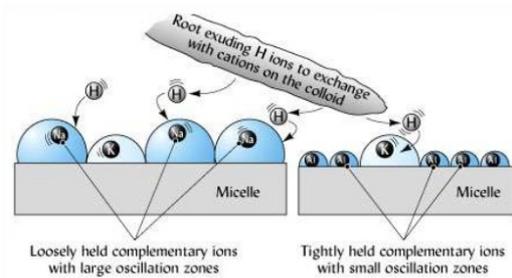
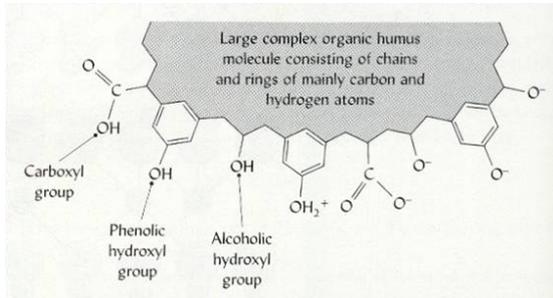
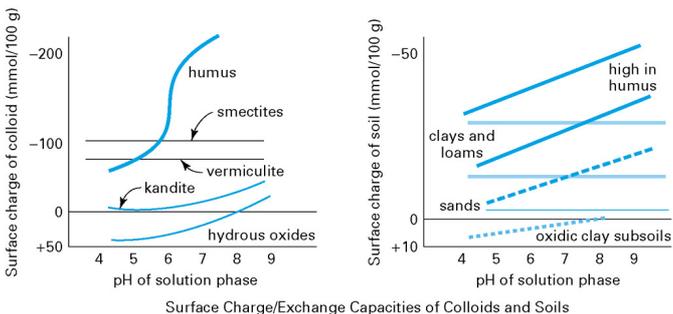
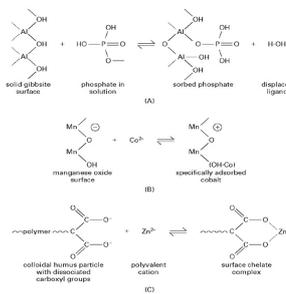
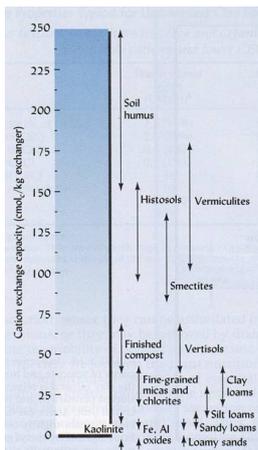


Figure 3-16 Some representative specific adsorption reactions. (A) Adsorption of phosphate on aluminum hydroxide (ligand exchange). (B) Adsorption of cobalt on manganese oxide. (C) Adsorption of zinc on humus (surface chelation).

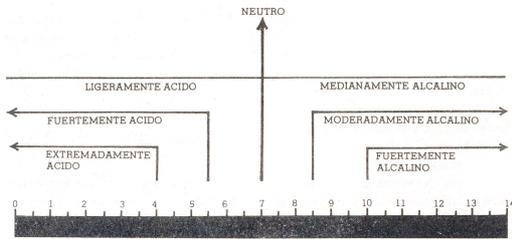


Valores generales de CIC



La reacción o acidez del suelo

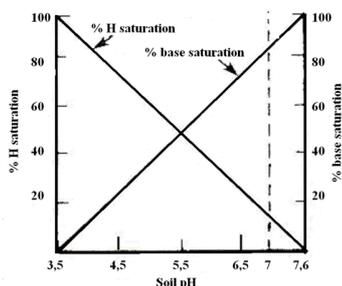
$$\text{pH} = \log 1/[\text{H}^+]$$



Ámbito de variación e interpretación en la escala de pH respecto a la solución del suelo. (oscila generalmente entre 4 y 10).

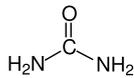
- La acidez predomina en suelos de zonas de alta precipitación, en que las bases de cambio se han lixiviado. Al ocurrir esto, las arcillas se saturan con iones H^+ y Al^{3+} .
- La alcalinidad predomina cuando iones como el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ o K^+ predominan en los sitios de intercambio (saturación de bases es muy alta).

Nota: El porcentaje de saturación de bases (%SB) se define como la proporción de la CIC que está ocupada por los cationes no ácidos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+).



Causas de la acidez:

- Clima (lixiviación de bases)
- Material parental
- Producción de CO_2 por la actividad de los microorganismos del suelo y raíces de las plantas
- Producción de H^+ por las raíces de las plantas y posterior intercambio por bases adsorbidas a los coloides o en solución.
- Humificación de la materia orgánica
- Procesos de oxidación
- $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$
- $\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{SO}_2^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$
- Fertilización con productos acidificantes (ejemplo Urea)

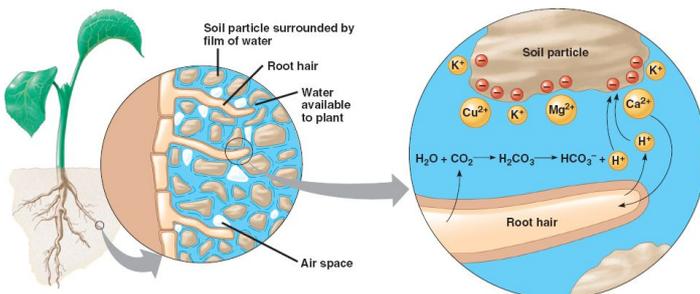


Los fertilizantes con un contenido de amonio (NH_4^+) elevado son acidificantes ya que:

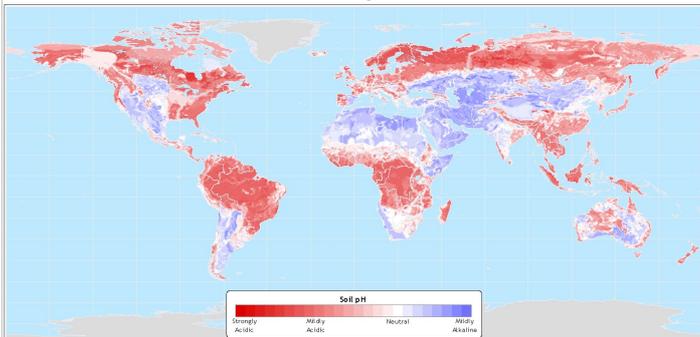
Las bacterias del suelo oxidan el amonio convirtiéndolo en nitrato (NO_3^-) en un proceso denominado **nitrificación**



El proceso de nitrificación produce dos iones hidrógeno (H^+) por cada molécula de amonio que reacciona con el oxígeno presente en el suelo. Es un proceso aeróbico



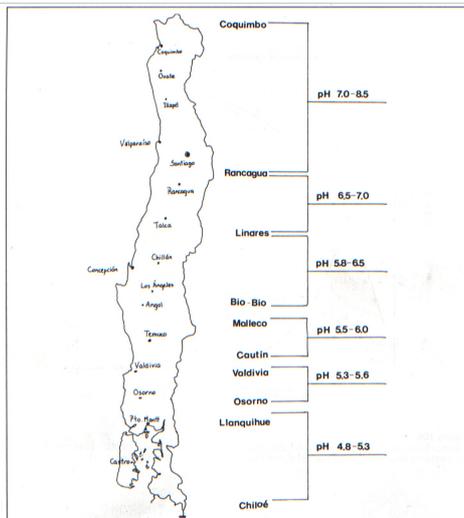
Soil pH



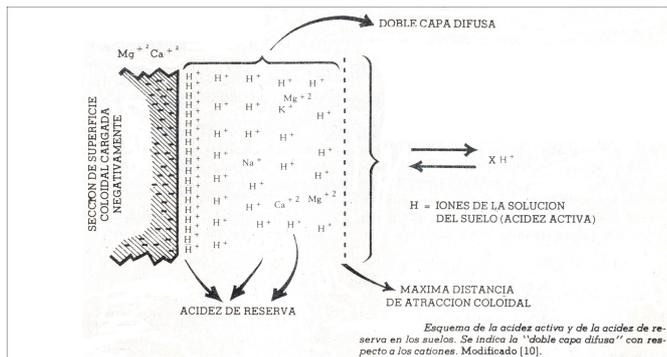
Data taken from: IGBP-DIS Global Soil Dataset (1998)

Atlas of the Biosphere
Center for Sustainability and the Global Environment
University of Wisconsin - Madison

Cambio en el pH del suelo en diferentes zonas del país



Tipos de acidez en los suelos

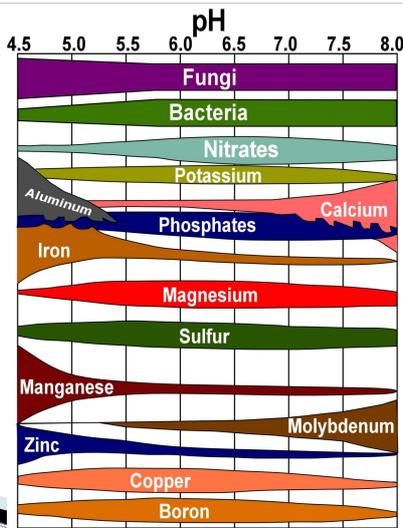


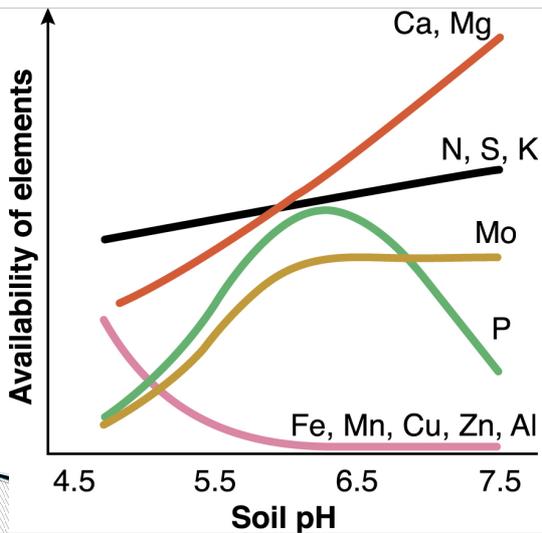
Acidez activa y la acidez de reserva, acidez potencial (también llamada acidez pasiva)

La acidez activa: se determina usualmente cuando se analiza una muestra de suelo se mezcla con agua destilada y se cuantifica el pH de la solución resultante (acidez comúnmente evaluada).

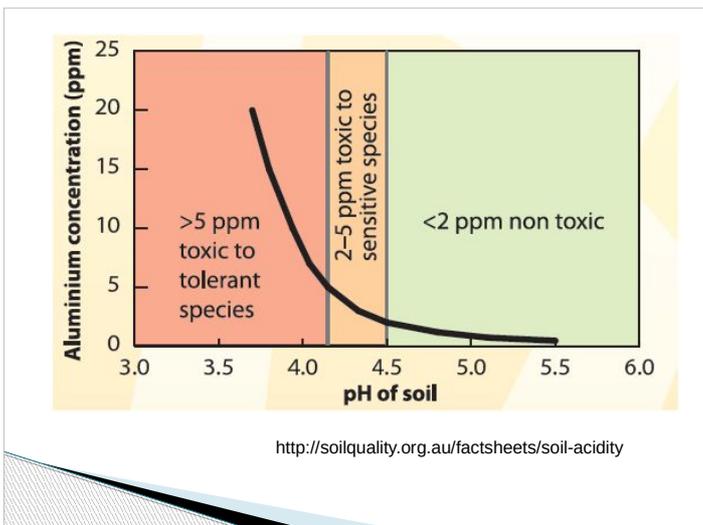
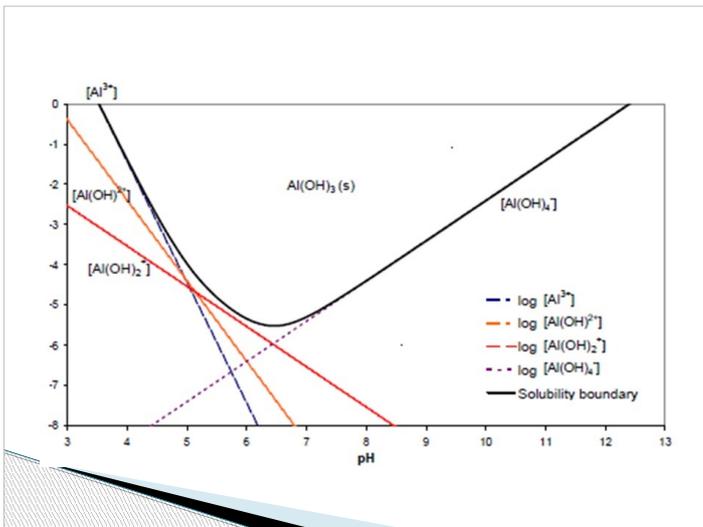
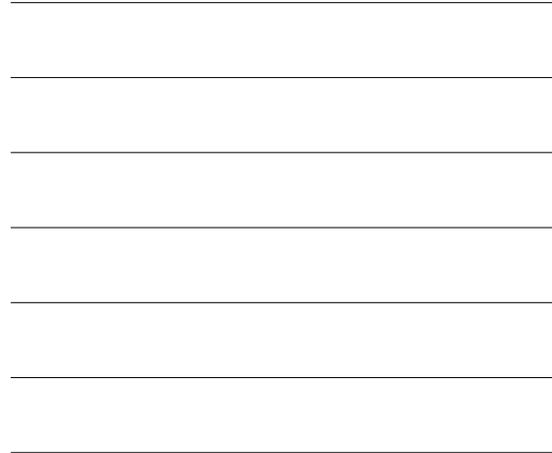
La acidez de reserva: corresponde a los iones H^+ retenidos en la superficie de las arcillas. (Cuando se utiliza KCl para el análisis de pH, el K desplaza a los iones H^+ adsorbidos a las arcillas y por lo tanto los iones H^+ pasan a la solución del suelo. De esta forma cuando uno determina el pH con KCl, se tiene un valor de acidez activa y pasiva a la vez. Se considera que la acidez de reserva es 1000 a 100000 veces mayor que la acidez activa).

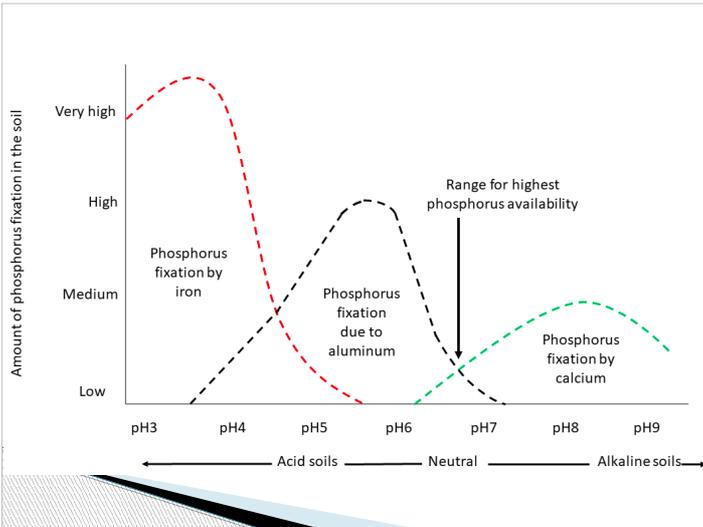
Efecto del pH en la disponibilidad de nutrientes, actividad biológica y otros elementos en el suelo





- Por qué el pH (concentración de iones H^+ en la solución) influye en la **biodisponibilidad** de los elementos y compuestos presentes en la solución suelo?
- La **biodisponibilidad** de un elemento o compuesto está muy relacionada a la **solubilidad** de éstos. A mayor solubilidad, mayor posibilidad de ser absorbido por los organismos.





La capacidad tampón o buffer de los suelos

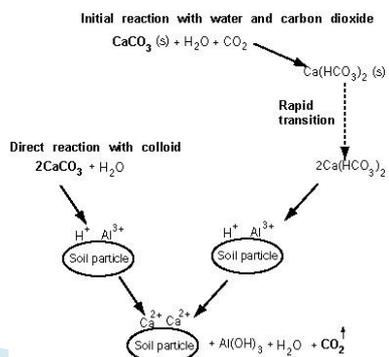
Capacidad de resistir a cambios en el pH de la solución suelo.

La capacidad buffer varía entre los suelos y es función de:

- CIC
- Saturación de H^+ y Al^{3+} o bien su opuesto el porcentaje de saturación de bases.
- Contenido de materia orgánica

Enmiendas para corregir el pH

Suelos ácidos: Encalado



Enmiendas calcáreas:

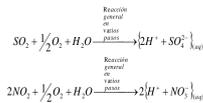
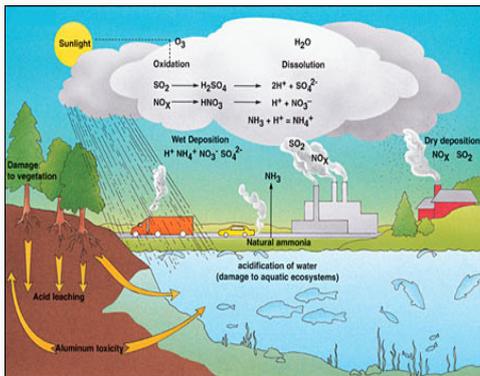
Carbonato de calcio CaCO_3

Hidróxido de calcio Ca(OH)_2

Óxido de Calcio CaO

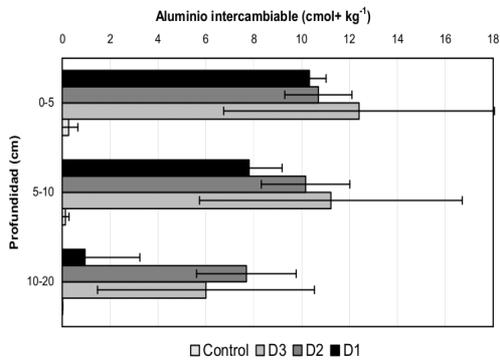


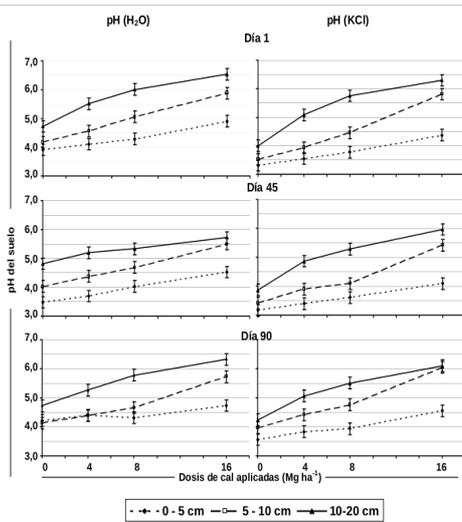
Lluvia ácida



Efectos visibles







Aplicación de diferentes dosis de CaCO_3 en los suelos más degradados y su efecto en el pH

Suelos afectados por sales y sodio

En los suelos afectados por sales y/o sodio principalmente se determina o caracteriza:

- Contenido de sales solubles (conductividad eléctrica)
- Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)
- Razón de adsorción de sodio (RAS)

Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

- Se define como la cantidad de sodio existente en los sitios de intercambio o proporción de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) ocupada por Na.

Razón de adsorción de sodio

- Es un análisis que evalúa los problemas físicos que puede tener un suelo debido a la preponderancia de Na⁺ (ión dispersante) respecto a Ca²⁺ y Mg²⁺ (iones agregantes)

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Suelos salinos y/o sódicos

Cultivos con Mal desarrollo y sobrevivencia debido a la salinidad



En general, se dan en zonas en que la precipitación es menor a la evapotranspiración, con condiciones de drenaje imperfecto que ayudan a la acumulación de sales.



Flora nativa adaptada a Condiciones de extrema salinidad



Pampa del Tamarugal, Chile



Suelo sódico (nótese las estructuras columnares típicas)

Tipos de suelos afectados por sales.

Suelo salino	> 4 mmhos/cm	< 15 PSI
Suelo salino-sódico	> 4 mmhos/cm	> 15 PSI
Suelo sódico	< 4 mmhos/cm	> 15 PSI
CATEGORÍAS DE SALINIDAD		
No salino	SO	CE (mmhos/cm) 0 - 2
Ligeramente salino	S1	2 - 4
Salino	S2	4 - 8
Muy salino	S3	8 - 12
Extremadamente salino	S4	> 12
CATEGORÍAS DE ALCALINIDAD		
No alcalino	AO	% Na (PSI) 0 - 10
Ligeramente alcalino	A1	10 - 15
Alcalino	A2	15 - 25
Muy alcalino	A3	25 - 40
Extremadamente alcalino	A4	> 40
Relación de adsorción de sodio		
Sin problemas	RAS	< 10
Problemas crecientes	10 - 15	
Serios problemas	> 15	

1 mmho/cm = 1dS/m

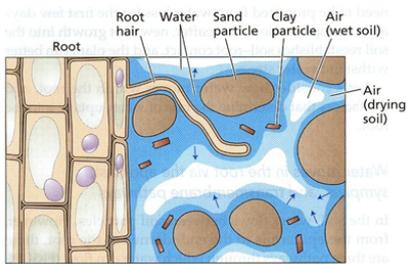
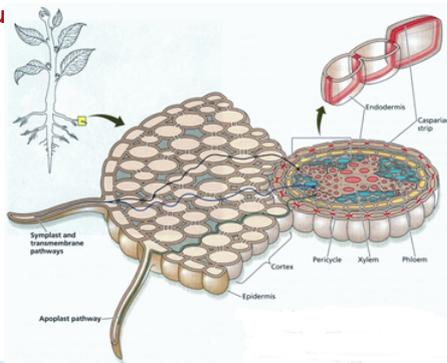
Sabemos que los nutrientes esenciales para las plantas se encuentran en la solución suelo en forma de iones.

Macronutrientes	Formas iónicas
Nitrógeno (N)	NH_4^+ y NO_3^-
Fósforo (P)	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}
Potasio (K)	K^+
Calcio (Ca)	Ca^{2+}
Magnesio (Mg)	Mg^{2+}
Azúfre (S)	SO_4^{2-}

Micronutrientes	Formas iónicas
Boro (B)	BO_3^{3-}
Cobre (Cu)	Cu^{2+}
Hierro (Fe)	Fe^{2+} , Fe^{3+}
Cloro (Cl)	Cl^-
Manganeso (Mn)	Mn^{2+}
Molibdeno (Mo)	MoO_4^{2-}
Zinc (Zn)	Zn^{2+}

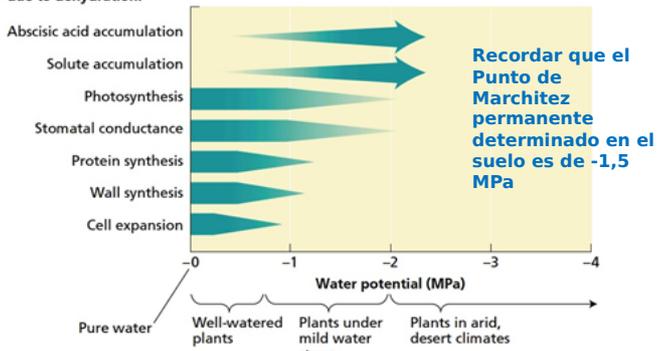
Ver lectura : Tree growth and essential nutrient elements (Davey, SA)

La absorción de estos iones por las raíces de las plantas depende de la fisiología de las raíces, del movimiento de la solución suelo (movimiento del agua) y el movimiento de iones en la solu



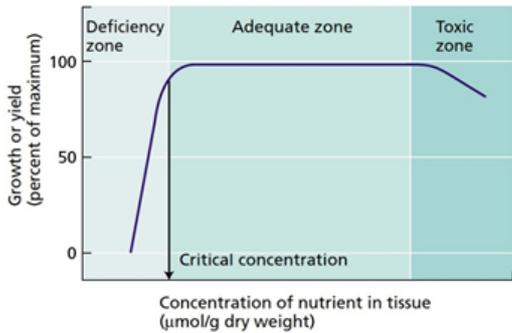
Los pelos radicales están en íntimo contacto con las partículas de suelo y la solución suelo, amplificando enormemente el área superficial para la absorción de agua y nutrientes por las plantas (Fuente: Taiz L., Zeiger E., 2010)

Physiological changes due to dehydration:



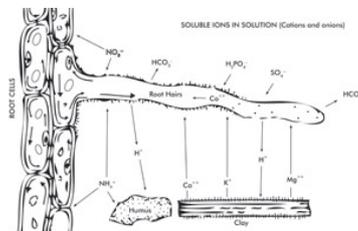
Sensibilidad de varios procesos fisiológicos debido a cambios en el potencial de agua bajo varias condiciones de crecimiento (Fuente: Taiz L., Zeiger E., 2010).

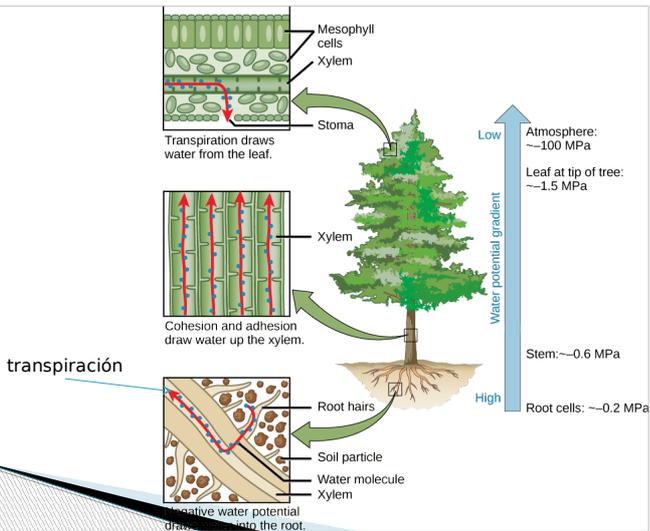
El flujo de iones a las raíces influye directamente en la concentración de los nutrientes en los tejidos de las plantas y por lo tanto en el crecimiento o productividad de éstas.

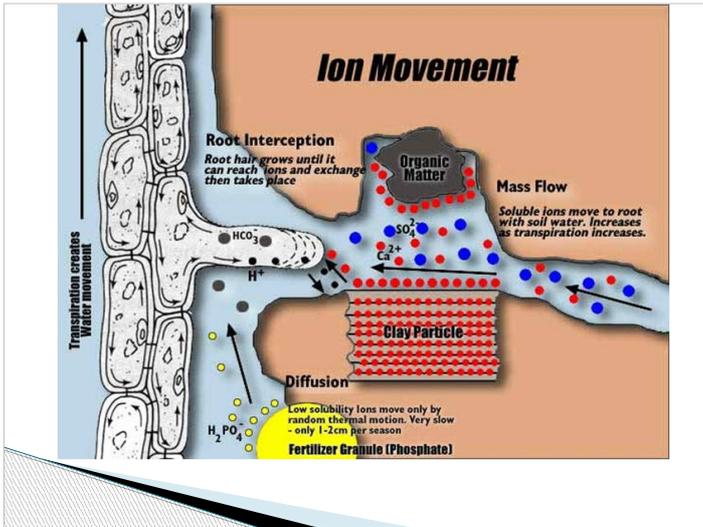


El movimiento de iones en el suelo se da mediante tres procesos:

- Flujo de masas
- Difusión
- Intercepción



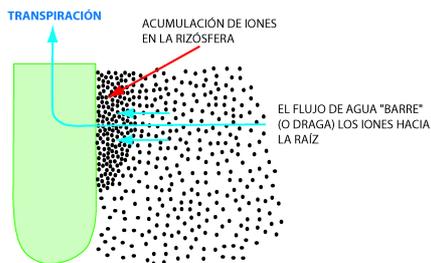




FLUJO DE MASAS

- El flujo de masas es el movimiento de iones en conjunto con el agua a través del suelo.
- El flujo de iones es entonces función de la precipitación, riego, evapotranspiración.
- Los iones que usualmente se mueven por flujo de masas son los nitratos (NO_3^-) y el cloro (Cl^-). En menor grado el sulfato (SO_4^{2-}), K^+ y Mg^{2+} también se movilizan por flujo de masas.
- Otros iones también pueden ser movilizados con el agua dependiendo de las características físicas y químicas del suelo y de las concentración y características de esos otros elementos en el suelo.

FLUJO DE MASAS

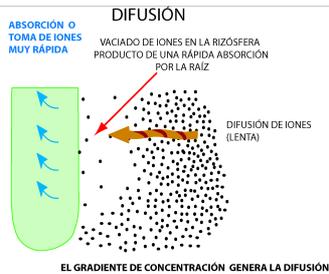


$$\text{TASA DE FLUJO DE MASA} = \text{TASA DE FLUJO DE AGUA} \times \text{CONCENTRACIÓN IÓN EN SOLUCIÓN}$$

$$Q = V \times C$$

DIFUSIÓN

- Es el flujo de iones a través de las películas de agua existentes alrededor de las partículas y poros capilares.
- La fuerza para el flujo de iones es el gradiente de concentración .
- Los iones se movilizan desde zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración.
- La mayoría de los iones en solución se mueven por difusión pero en pequeñas distancias.



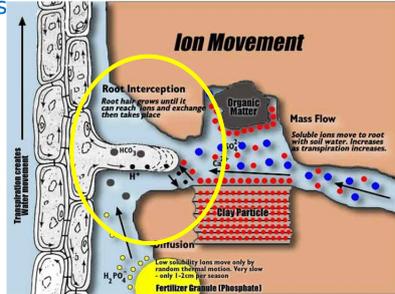
$$Q = A k \frac{dC}{dx}$$

El flujo de nutrientes por difusión complementa al flujo de masas actuando de manera conjunta. El flujo de iones (Q) depende del gradiente de concentración, dC/dx , (y que corresponde a la diferencia en concentración entre dos puntos (dC), localizados a una distancia dx), y a un coeficiente de difusión (k) que expresa la facilidad de movimiento de un ión en particular. El coeficiente A, expresa el área de sección transversal por donde ocurre el flujo.

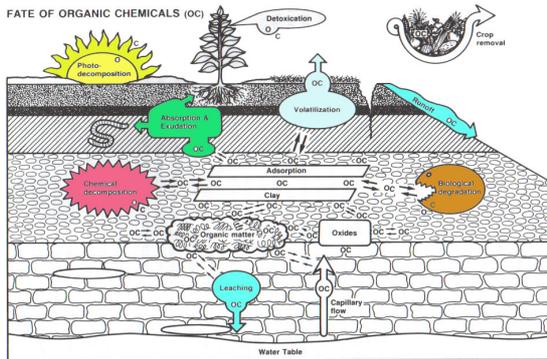
- Todos los solutos (iones) se difundirán con menor libertad si el suelo se encuentra seco y frío como también si éstos interactúan con las partículas sólidas del suelo (arcillas, humus).
- Iones como $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , Zn^{2+} y Cu^{2+} son fuertemente fijados por las partículas del suelo y por ende su difusión es mucho más lenta comparada con la de NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} y K^+ .

INTERCEPCIÓN

- La intercepción de iones por las raíces ocurre por el crecimiento de éstas a través del suelo.
- El estrecho contacto entre las raíces y las partículas de suelo aumentan la probabilidad de absorción directa de los iones.



¿Qué destino tienen otros compuestos que no son necesariamente nutrientes para las plantas? Ejemplo: químicos orgánicos.



Processes affecting the dissipation of organic chemicals (OC) in the environment. Degradation processes are characterized by the splitting of the OC molecule. Transfer processes are characterized by the OC molecules remaining intact.

WEBER & MILLER
