

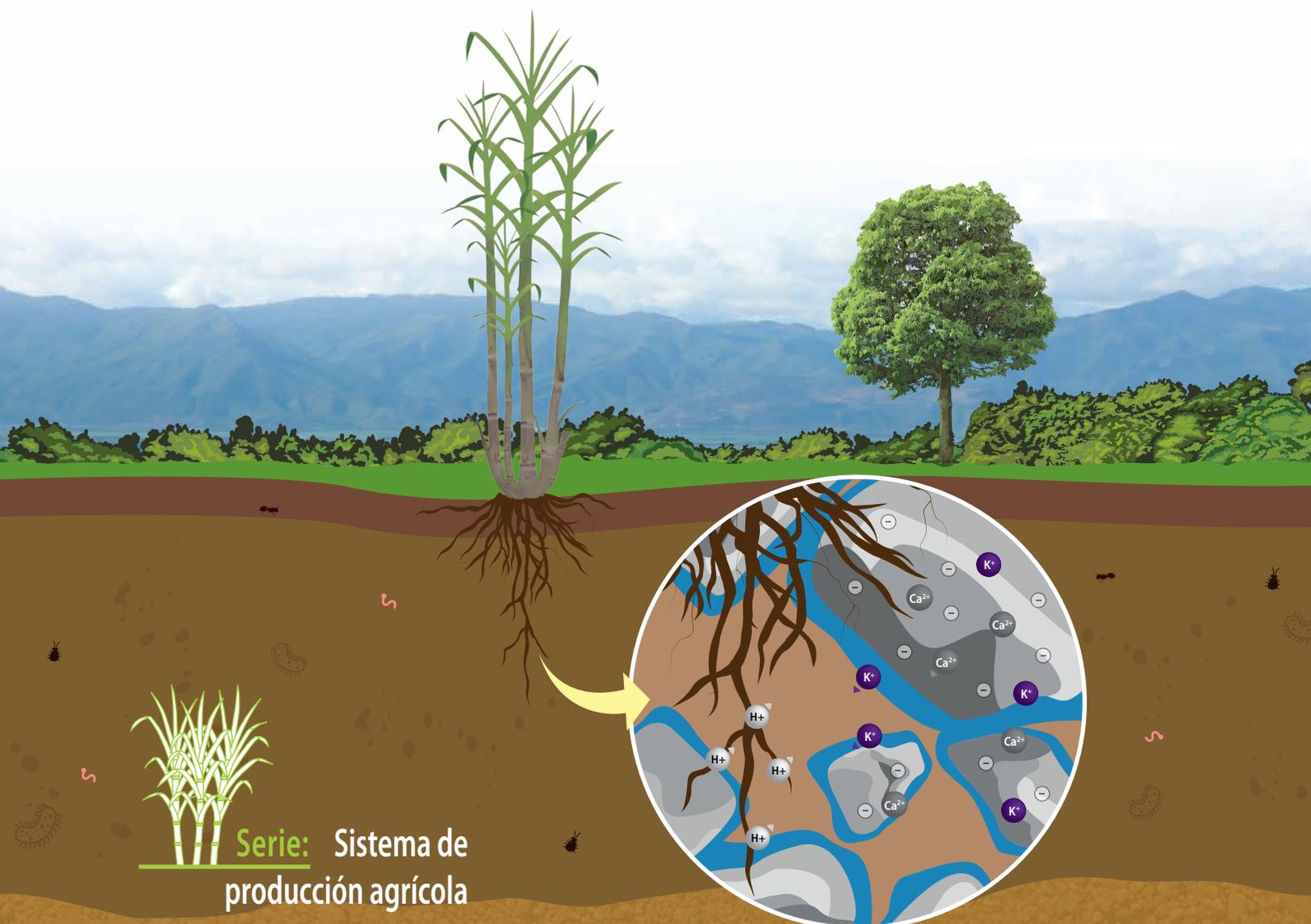


Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar



Conceptos básicos del suelo y su fertilidad para la nutrición de la caña de azúcar

Fernando Muñoz Arboleda



Serie: Sistema de producción agrícola

El autor

Fernando Muñoz Arboleda

Nació en Cali, Colombia. Asistió al Colegio Santa Librada, donde completó su bachillerato. Se graduó de ingeniero agrónomo en la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, y tuvo la oportunidad de realizar su trabajo de pregrado en la Sección de Agronomía del Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, en Colombia. Una vez obtuvo su título de ingeniero agrónomo fue contratado como asistente de investigación en el Programa de Yuca del CIAT. En 1991, ganó una beca del gobierno de Holanda para asistir al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, en Turrialba, Costa Rica, donde desarrolló su trabajo de investigación en el Proyecto Agroforestal CATIE-GTZ y alcanzó el título de Maestría en Sistemas de Producción con énfasis en Agroforestería. Regresó al CIAT para trabajar como asociado de investigación en la Sección de Fitonutrición del Programa de Frijol y posteriormente, en 1998, se unió al equipo de investigación de la Sección de Patología del Programa de Forrajes Tropicales. En agosto de 2001 comenzó su programa de doctorado en la Universidad de la Florida en Gainesville, U.S.A., donde trabajó como asistente de investigación en el Departamento de Suelos y Aguas, y alcanzó el título de Ph. D. en Suelos y Aguas con énfasis en Manejo de Nutrientes. En agosto de 2004 pasó al Departamento de Horticultura de la Universidad de la Florida donde se desempeñó como asociado posdoctoral hasta diciembre de 2006, cuando regresó a Colombia para unirse al equipo del Programa de Agronomía del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, Cenicaña, donde se desempeña actualmente como Edafólogo.



Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar



Conceptos básicos del suelo y su fertilidad para la nutrición de la caña de azúcar

Fernando Muñoz Arboleda



Serie: Sistema de
producción agrícola

Copyright © 2016 por Cenicaña®

Dirección postal: Calle 58 Norte # 3BN-110. Cali, Colombia.
Estación Experimental: vía Cali-Florida km 26,
San Antonio de los Caballeros, Colombia.

www.cenicana.org
buzon@cenicana.org

Mayo de 2016

Todos los derechos reservados.

Prohibida la reproducción total o parcial de este libro, por cualquier medio, sin permiso de Cenicaña.

Producción editorial: Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología (SCTT, Cenicaña).

Estrategia de transferencia de tecnología: Camilo H. Isaacs E., jefe SCTT.

Coordinación editorial: Victoria Carrillo C.

Diseño gráfico y diagramación: Alcira Arias V., Andrea Campiño B.

Material producido en el marco del Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica, PAT.

Cita bibliográfica:

Muñoz Arboleda, F. 2016. Conceptos básicos del suelo y su fertilidad para la nutrición de la caña de azúcar. Cenicaña. Cali, Colombia. 20 p. (Materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar. Sistema de producción agrícola).

Contenido

Introducción	4
El suelo y la sostenibilidad del sistema productivo de la caña de azúcar.....	5
Intercambio iónico en los suelos.....	6
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	7
• Sustitución isomórfica (carga permanente)	10
• Carga de borde (carga dependiente del pH)	10
• Saturación de bases	11
• Cuantificación de la CIC	12
Capacidad de amortiguación iónica del suelo	13
Solubilidad de los minerales en el suelo	14
Suministro de nutrimentos desde la materia orgánica (MO)	14
Movimiento de los iones en el sistema suelo-planta: la rizósfera	15
La textura de los suelos y su relación con la fertilización	17
El pH del suelo	17
• Acidez y alcalinidad de los suelos y su relación con la nutrición	17
• Encalamiento de suelos ácidos	18
• Acidificación de suelos calcáreos o básicos	19
Referencias bibliográficas	20



En el valle del río Cauca se han identificado 238 diferentes tipos de suelos, en general muy fértiles.

Introducción

El suelo es la base de la producción agrícola, pues provee a los cultivos los recursos necesarios para su desarrollo. Sin embargo, puede ocurrir que algunos elementos nutritivos no se encuentren presentes en el suelo en la cantidad que requiere un cultivo para alcanzar su máxima productividad. Es por ello que se realiza la labor de fertilización, con el fin de aportar la cantidad de nutrimentos necesaria. Para calcular correctamente la dosis de fertilizante por aplicar es preciso conocer aspectos químicos, físicos y biológicos del suelo.

Este documento presenta de manera breve y concisa los conceptos básicos del suelo que tienen relación con su fertilidad y con la nutrición de la caña de azúcar. Ha sido diseñado para enunciar los conceptos sin profundizar en ellos. El desarrollo de los mismos se hará en sesiones presenciales orientadas por el autor, las cuales estarán dirigidas a los facilitadores de la transferencia de tecnología en nutrición y fertilización, en el marco del Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica, PAT.

Al finalizar esta sesión de repaso y actualización, los asistentes estarán en capacidad de analizar con confianza los diferentes escenarios que deben considerarse al planear la labor de fertilización, lo cual ayudará a tomar decisiones acertadas que permitan lograr y mantener una alta productividad de la caña de azúcar en el valle del río Cauca preservando el suelo como recurso base del sistema productivo.

El suelo y la sostenibilidad del sistema productivo de la caña de azúcar

El suelo está compuesto por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida la conforman materiales orgánicos e inorgánicos; en la fase líquida se pueden encontrar parte de esos materiales en suspensión; y la fase gaseosa la constituye básicamente el aire, con una composición similar a la atmosférica, pero por efecto de los diferentes procesos bioquímicos que suceden en el medio edáfico puede presentarse un enriquecimiento (CO_2 , N_2O , CH_4) o agotamiento (O_2 , N_2) de sus diferentes componentes.

La composición de la fase mineral sólida depende del material parental del cual se ha formado el suelo. En el caso del valle del río Cauca, este material lo constituyen elementos presentes originalmente en el suelo y aquellos arrastrados desde diferentes sitios de la cuenca hidrográfica del río Cauca y depositados en el suelo. La gran dinámica de los procesos formadores del suelo ha hecho que la región tenga una alta diversidad de suelos. En los estudios detallados de las áreas cultivadas con caña de azúcar se han identificado 238 diferentes tipos de suelos, en general muy fértiles debido a su composición mineralógica.

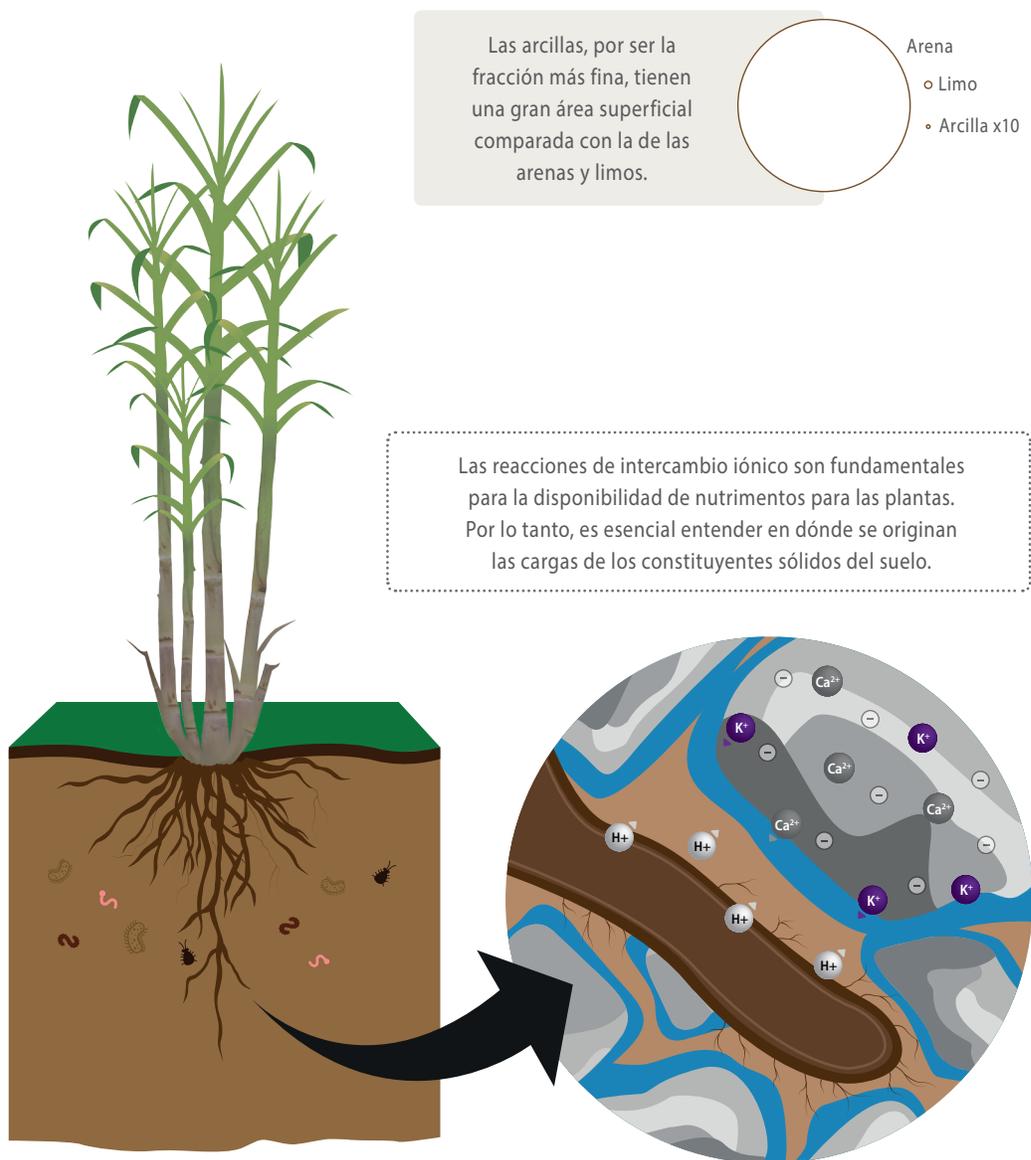
Para propender por su conservación, se expondrá en qué consiste la capacidad de intercambio catiónico (CIC), esa propiedad de los suelos que les permite, como su nombre lo indica, retener cationes en forma intercambiable, es decir, en forma disponible para las raíces de las plantas. Derivadas del concepto de CIC se explicarán otras nociones, como los reservorios de nutrimentos, el complejo de cambio, la solución del suelo, la materia orgánica, el origen de los nutrimentos presentes en el medio edáfico y las formas en las cuales estos son absorbidos por las plantas.



La gran dinámica de los procesos formadores del suelo en el valle del río Cauca ha hecho que la región tenga una alta diversidad de suelos.

Intercambio iónico en los suelos

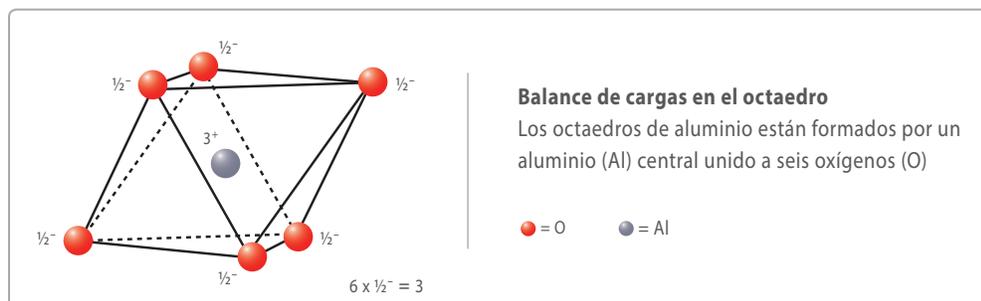
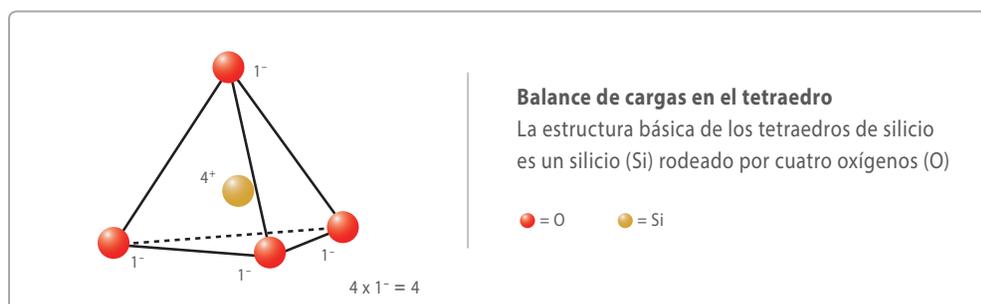
El intercambio iónico en los suelos sucede en la superficie de minerales arcillosos, componentes inorgánicos, materia orgánica y raíces. Esta reacción es un proceso reversible por el cual un catión o un anión adsorbidos sobre la fase sólida son intercambiados por otro catión o por otro anión en la fase líquida, aunque si hay contacto entre dos fases sólidas también puede haber intercambio iónico entre sus superficies. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos es considerada la más importante, ya que la capacidad de intercambio aniónico (CIA) es muy pequeña en la mayoría de los suelos. La CIC depende en gran parte del porcentaje y tipo de arcillas que componen la fase mineral de un suelo.



Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La parte sólida del suelo representa cerca del 50% de su volumen; el resto lo componen aire y agua. La porción sólida la integran materiales inorgánicos (sustancias no-húmicas) y materia orgánica en diferentes estados (sustancias húmicas). Los materiales inorgánicos son arena, limo y arcilla y, en algunos suelos, fragmentos de roca en diferentes cantidades.

La fracción de arcilla está compuesta, a su vez, principalmente por minerales llamados alúmino-silicatos, que son combinaciones de capas de tetraedros de silicato y capas de octaedros de aluminio. Se forman, entonces, largas cadenas o capas de tetraedros y octaedros que se unen y forman los silicatos laminares.

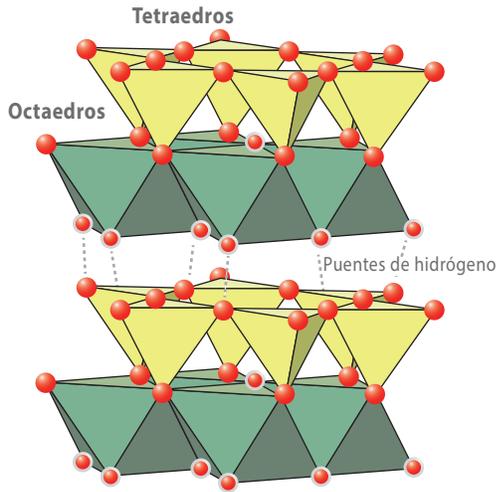


Las arcillas 1:1 están conformadas por una capa de octaedros y una de tetraedros, la unión entre las láminas de las arcillas se produce por puentes de hidrógeno. La caolinita es la arcilla más representativa de este grupo.

Las arcillas 2:1 están compuestas por una capa de octaedros de aluminio entre dos capas de tetraedros de silicio, la unión entre las láminas de las arcillas se produce por las 'fuerzas de van der Waals'. Ejemplos de estas arcillas son la montmorillonita (smectitas) y la illita (micas). La relativamente débil fuerza de van der Waals permite que iones de Ca, Mg, K y Na y moléculas de agua ingresen entre las láminas de estas arcillas y produzcan un "hinchamiento" de las láminas que es típico de arcillas expandibles como la montmorillonita y la vermiculita. El efecto contrario (secamiento) lo vemos en el campo como suelos agrietados.

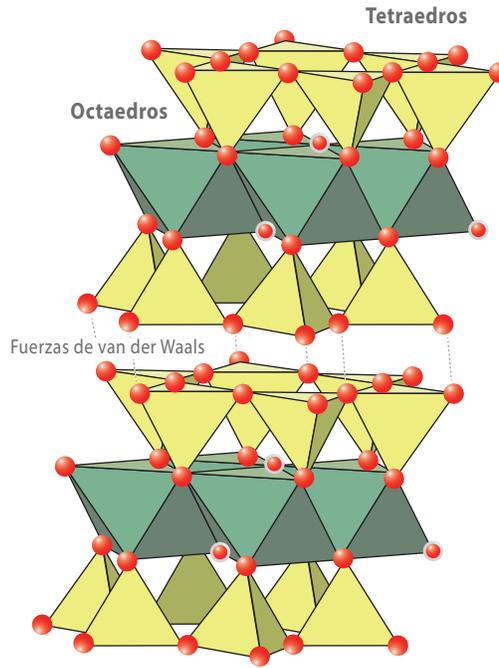
Arcillas 1:1

Las láminas de arcilla se unen por puentes de hidrógeno.
Ejemplo: caolinita.



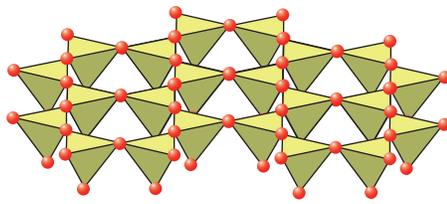
Arcillas 2:1

Las láminas de arcilla se unen por 'fuerzas de van der Waals'.
Ejemplo: montmorillonita.

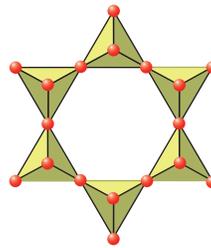


● = O ● = OH

Lámina tetraedros

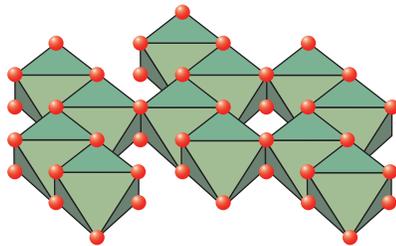


Vista tridimensional

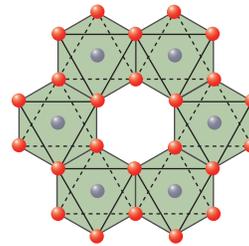


Vista superior

Lámina octaedros

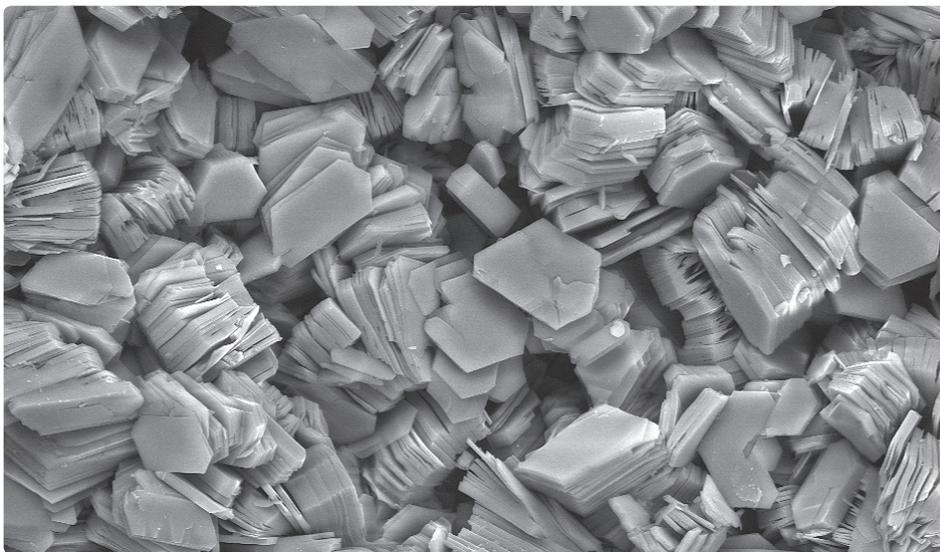


Vista tridimensional



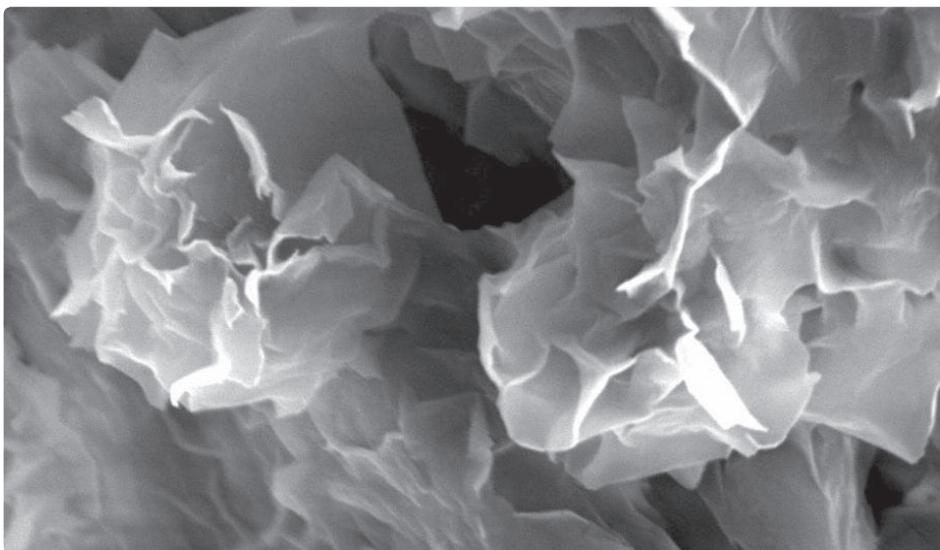
Vista superior

Microfotografía de la dickita, arcilla 1:1, grupo de las caolinitas.



10 μm

Microfotografía de la montmorillonita, arcilla 2:1, grupo de las esmectitas.



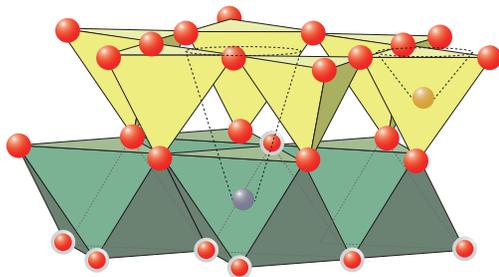
10 μm

Imágenes reproducidas de 'Images of Clay Archive' of the Mineralogical Society of Great Britain & Ireland and The Clay Minerals Society (www.minersoc.org/gallery.php?id=2.)

Sustitución isomórfica (carga permanente)

La capacidad de las arcillas para adsorber cationes se origina cuando en la estructura de los octaedros y/o tetraedros sucede lo que se conoce como sustitución isomórfica, fenómeno por el cual el Al^{3+} de los octaedros o el Si^{4+} de los tetraedros fueron reemplazados por otro catión de menor valencia, lo cual produce un exceso de carga negativa que atrae los cationes a la superficie de las arcillas. La sustitución isomórfica se presenta principalmente en las arcillas 2:1 y en mucho menor escala en las arcillas 1:1.

Sustitución isomórfica



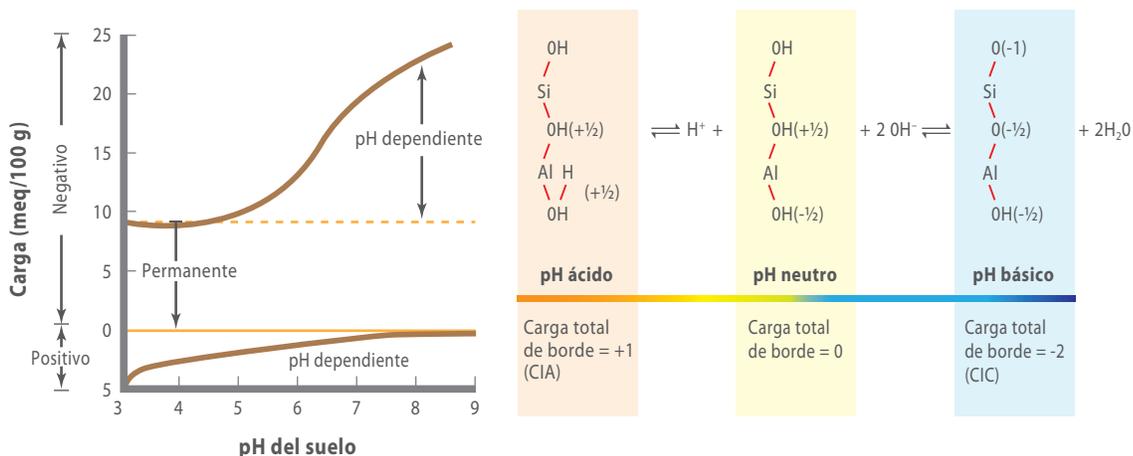
La intensidad de la carga generada por la sustitución isomórfica depende de la capa en la cual esta sucede.

A mayor separación de la superficie, menor la carga.

Carga de borde (carga dependiente del pH)

Cuando las cargas electrónicas de las capas de tetraedros y octaedros se encuentran balanceadas (sin sustitución isomórfica), las arcillas no tienen carga de superficie y solo presentan cargas de borde, que dependen del pH de la solución del suelo. La carga dependiente del pH o carga de borde, como indica su nombre, se encuentra localizada en el borde de las láminas que conforman las arcillas. En ese sitio puede presentarse carga negativa o carga positiva, lo cual depende del pH de la solución del suelo. En suelos ácidos la carga positiva de los bordes se incrementa y causa aumento de la CIA; lo contrario sucede en suelos alcalinos, donde se aumenta la CIC.

Carga permanente y carga dependiente del pH en las arcillas



Como se observa en el Cuadro 1, gran parte de los nutrientes esenciales son absorbidos por las plantas en forma catiónica; de ahí la importancia de la capacidad de intercambio catiónico de los suelos. Cuanto más alta la CIC, mayor será la capacidad del suelo para retener cationes en forma intercambiable. Esto explica en gran medida la alta fertilidad de los suelos del valle del río Cauca.

Otra fuente de CIC dependiente del pH es la materia orgánica (MO). La mayoría de la carga negativa se origina de la disociación de iones H^+ del ácido carboxílico, y en menor proporción de los grupos fenólicos ácidos. Cuando sube el pH algunos de los iones H^+ son neutralizados, lo que incrementa la carga negativa de la MO. A pesar de que la CIC de la MO depende del pH del suelo, la MO contribuye de una forma importante a la CIC total del suelo. La MO del suelo puede representar 100-300 meq/100 g de suelo (Havlin *et al*, 2013).

Al igual que la MO, la raíz de las plantas tiene una CIC que va de 10–30 meq/100 g en monocotiledóneas (gramíneas) a 40–100 meq/100 g en dicotiledóneas (hoja ancha, leguminosas). La capacidad de intercambio catiónico de las raíces se atribuye principalmente a los grupos carboxilos (COOH), y es similar a los puntos de intercambio en el humus; estos puntos de intercambio representan entre el 70% y el 90% de la CIC de la raíz. Las leguminosas tienden a absorber preferencialmente cationes divalentes antes que monovalentes, mientras lo inverso sucede con las gramíneas. Esto explica por qué en suelos bajos en K^+ las gramíneas sobreviven pero las leguminosas desaparecen. Las gramíneas absorben el potasio más efectivamente que las leguminosas (Havlin *et al*, 2013).

Saturación de bases

Una propiedad también muy importante de los suelos, se define como el porcentaje total de la CIC que es ocupado por los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ . La saturación de bases generalmente se incrementa con el aumento del pH.

Cuadro 1. Nutrientes esenciales y su forma de absorción por las plantas.

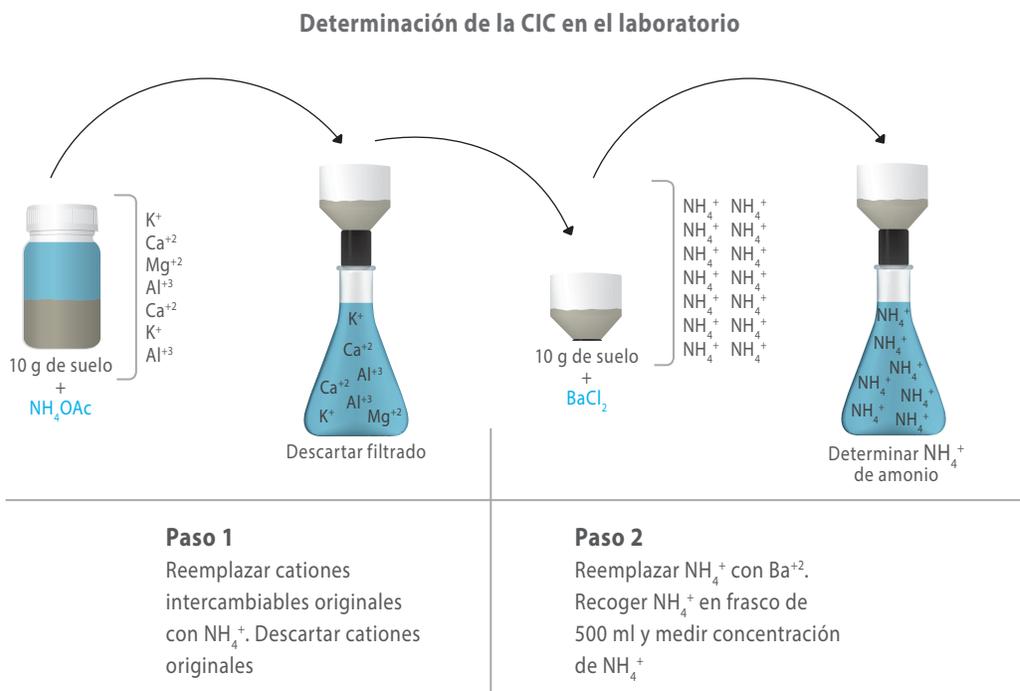
Nutriente	Forma de absorción
Nitrógeno (N)	NO_3^- NH_4^+
Fósforo (P)	$H_2PO_4^-$ (suelos ácidos) $H_2PO_4^{2-}$ (suelos básicos)
Potasio (K)	K^+
Calcio (Ca)	Ca^{2+}
Magnesio (Mg)	Mg^{2+}
Azufre (S)	SO_4^{2-}
Hierro (Fe)	Fe^{2+} Fe^{3+}
Mn (Mn)	Mn^{2+}
Cobre (Cu)	Cu^{2+}
Zinc (Zn)	Zn^{2+}
Boro (B)	$H_3BO_3^0$
Molibdeno (Mo)	MoO_4^{2-}

Cuantificación de la capacidad de intercambio catiónico, CIC

Como se dijo, la CIC es una de las más importantes propiedades químicas de los suelos que influyen sobre la propiedad que tienen estos de retener los nutrientes que requiere un cultivo. Por ello es importante recordar algunos conceptos básicos de química para entender su cuantificación:

- **Peso atómico:** es la masa (g) de 6×10^{23} átomos de una sustancia. Una mole de una sustancia es igual a 6×10^{23} átomos, moléculas, iones, cargas, etc. Las unidades de peso atómico son gramos por mole (g/mole).
- **Peso equivalente:** es la masa (g) de una sustancia que reaccionará con 1 g de H^+ o una mole (6×10^{23}) de cargas. Las unidades de peso equivalente son gramos por equivalente (g/eq). (Havlin *et al*, 2013).

La CIC se determina convencionalmente mediante la extracción de una muestra de suelo con acetato de amonio (NH_4OAc) 1N a pH 7.0. Se agrega suficiente NH_4^+ para que este reemplace todos los cationes intercambiables, de tal forma que la CIC queda saturada con NH_4^+ . A continuación el NH_4^+ se desplaza de la CIC con otra sal como el cloruro de bario ($BaCl_2$); la suspensión suelo- $BaCl_2$ es filtrada, y el filtrado contendrá el amonio que fue previamente adsorbido en la CIC. La cantidad de NH_4^+ de amonio en el filtrado es una medida de la CIC (Havlin *et al*, 2013).



Capacidad de amortiguación iónica del suelo

La disponibilidad de los nutrimentos depende de su concentración en solución, pero mucho más de la capacidad del suelo para mantener la concentración de los iones en solución. En este sentido, la capacidad de amortiguación iónica del suelo es la capacidad de los componentes sólidos del suelo para reponer iones a la solución del suelo después de que estos han sido absorbidos por las raíces de las plantas. La capacidad de amortiguación de un suelo involucra la CIC y la CIA, ya que los iones adsorbidos en los sitios de intercambio son los que reponen los iones a la solución del suelo (Cuadro 2). De igual manera, cuando un suelo es encalado los iones H^+ de la solución del suelo son neutralizados por el material que se usa como enmienda, e inmediatamente, desde los sitios de intercambio, son desorbidos iones H^+ para reponer los que fueron neutralizados por la enmienda. Con esto el pH del suelo no se incrementará hasta que una cantidad significativa de iones en los sitios de intercambio haya sido neutralizada. Similar fenómeno ocurre cuando las plantas absorben de la solución del suelo nutrimentos como el K^+ , que es desorbido desde el complejo de cambio para reemplazar el que la planta tomó de la solución del suelo. Lo aquí descrito demuestra la importancia de la amortiguación iónica del suelo para suministrar al cultivo los nutrimentos que requiere.

Cuadro 2. Cationes y aniones asociados con la superficie de intercambio en el suelo.

Iones	Peso atómico (g/mole)	Peso equivalente (g/eq) o (mg/meq)	Radios iónicos (nm)	
			No hidratados	Hidratados
Cationes				
Al^{+3}	27	9	0.051	-
H^+	1	1	-	-
Ca^{+2}	40	20	0.099	0.96
Mg^{+2}	24	12	0.065	1.08
K^+	39	39	0.133	0.53
NH_4^+	18	18	0.143	0.54
Na^+	23	23	0.095	0.79
Aniones				
$H_2PO_4^-$	97	97	-	-
SO_4^{-2}	96	48	-	-
NO_3^-	62	62	-	-
Cl^-	35	35	-	-
OH^-	17	17	-	-

Solubilidad de los minerales en el suelo

Los procesos de disolución y precipitación de minerales influyen sobre la distribución de las sustancias inorgánicas entre las fases sólida y de solución del suelo. La intensidad de estos procesos depende de la actividad iónica de la solución del suelo y de la estabilidad intrínseca de los minerales involucrados. Existe la idea errada de que hay minerales insolubles, cuando lo que realmente ocurre es que los minerales que parecen insolubles son muy poco solubles. No hay ningún mineral insoluble en agua, pues todos lo son en mayor o menor grado (Essington, 2004).

Cuando las concentraciones de nutrientes en la solución del suelo decrecen por la absorción de las plantas, estos nutrientes son repuestos desde las superficies de intercambio por la MO o por la disolución de los minerales del suelo. La solubilidad de un mineral del suelo se refiere a la concentración de los elementos o iones en solución mantenidos por el mineral específico. Por ejemplo, cuando se añade $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ al agua, este se disuelve.



La reacción ocurre hacia la derecha (disolución), y la concentración de Ca^{+2} y SO_4^{-2} en la solución del suelo se incrementa hasta un punto en el cual la reacción comienza a ocurrir hacia la izquierda (precipitación) y se establece un equilibrio entre las dos reacciones, momento en el cual se dice que la solución está saturada (Havlin *et al*, 2013). La solubilidad de los minerales es una de las fuentes de reposición de nutrientes a los sitios de intercambio en las arcillas, óxidos y materia orgánica.

Suministro de nutrientes desde la materia orgánica (MO)

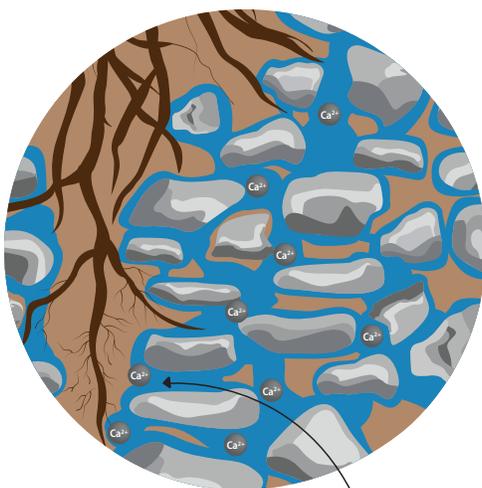
La materia orgánica está integrada por materiales orgánicos en todos los estados de descomposición. Los residuos del cultivo se degradan por efecto de procesos microbianos autotróficos y heterotróficos que al final forman compuestos húmicos muy estables (humus). La cantidad de compuestos húmicos depende de factores tales como clima, tipo de suelo y manejo del cultivo y del suelo, los cuales influyen en la cantidad de residuos producidos y retornados al suelo.

La biomasa de los organismos heterótrofos, responsables de la mayoría de los procesos de conversión inorgánicos-orgánicos, es apenas del 1% al 8% del total de la MO, pero son estos organismos los principales responsables de las transformaciones que influyen en la disponibilidad de los nutrientes.

El mayor componente de la MO es el humus (sustancias húmicas), muy resistente a la degradación microbiana pero responsable, sin embargo, de mantener en su nivel óptimo condiciones tan importantes para el desarrollo de las plantas como la capacidad de retención de humedad, la disponibilidad de nutrientes y la estructura del suelo. Los principales procesos implicados en el reciclaje y recambio de residuos frescos y humus son la mineralización y la inmovilización. Estas reacciones, combinadas con otros factores físicos, químicos y ambientales son muy importantes para la estabilidad de la MO y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

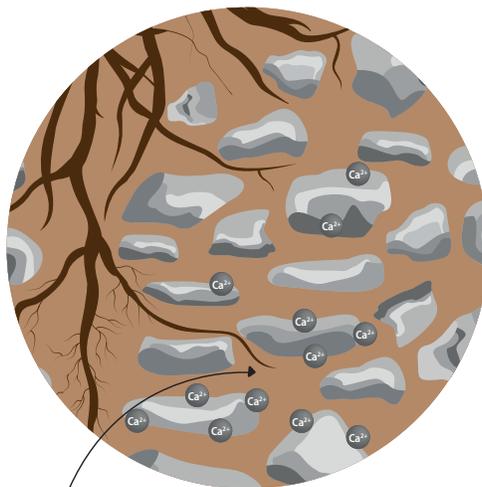
Movimiento de los iones en el sistema suelo-planta: la rizósfera

Los nutrimentos son absorbidos por la raíz en forma de iones, para lo cual estos tienen que entrar en contacto con la superficie radical. Hay tres formas principales por medio de las cuales los nutrimentos alcanzan la superficie de la raíz: flujo másico, intercepción y difusión. El Cuadro 3 muestra la contribución de cada forma de aporte de nutrimentos a la raíz para el cultivo de maíz.



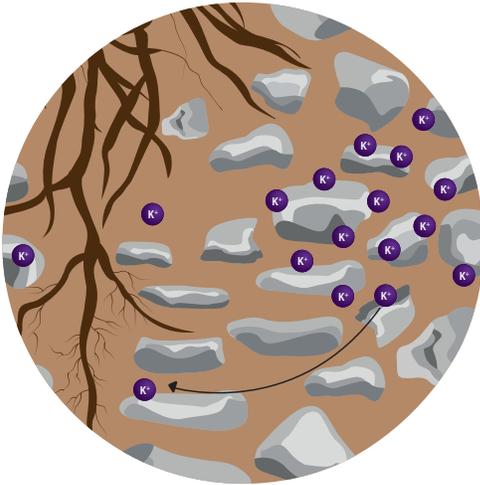
Flujo másico

El flujo másico ocurre cuando los iones son transportados hacia la raíz como resultado de la absorción de agua (transpiración) por la planta, de la evaporación desde la superficie del suelo y de la percolación de agua en el perfil del suelo. La cantidad de nutrientes que alcanzan las raíces a través del flujo másico está determinada por la tasa de flujo de agua o consumo de agua por la planta y por la concentración promedio de nutrientes en la solución del suelo. Por supuesto, este mecanismo de transporte iónico decrece con la reducción del contenido de humedad del suelo porque se incrementa la tensión de humedad. El flujo másico también disminuye en las noches, cuando se reduce la transpiración de las plantas.



Intercepción

La intercepción es el intercambio de iones por el contacto físico entre la raíz y las partículas del suelo a medida que crece la raíz. La cantidad de iones absorbidos por intercepción de las raíces se incrementa con el aumento del número de raíces en un volumen de suelo dado. Cuando crece la masa de raíces aumenta también el contacto con la superficie de arcillas, materia orgánica y solución del suelo y se incrementa, por tanto, la absorción de iones adsorbidos en las arcillas y la materia orgánica y disueltos en la solución del suelo. La intercepción puede ser mejorada por las micorrizas, ya que estas actúan como extensiones del sistema radicular y permiten expandir el contacto con las partículas del suelo.



Difusión

La difusión ocurre cuando un ion se mueve de un área de alta concentración a una de baja concentración. A medida que las raíces absorben nutrientes de la solución del suelo circundante, la concentración del nutriente disminuye en la superficie de la raíz comparada con la concentración del nutriente en el suelo alejado de la raíz. Por lo tanto, se crea un gradiente de concentración que causa que los iones se muevan hacia la raíz. Un alto requerimiento del nutriente por la planta resulta en un gran gradiente de concentración, lo que favorece una elevada tasa de difusión del ion desde la solución del suelo hacia la superficie de la raíz. La mayoría del P y el K se mueven hacia la raíz por difusión.

Las raíces no absorben todos los nutrientes a la misma tasa, lo cual causa que ciertos iones se acumulen en la superficie de la raíz, especialmente durante periodos de absorción rápida de agua. Esta situación crea una difusión inversa que moverá los iones desde la raíz hacia la solución del suelo, aunque este tipo de difusión es menos común que la difusión desde la solución del suelo hacia la raíz. Sin embargo, cuando sucede la difusión inversa la alta concentración de un ion en la rizósfera puede bloquear la toma de otros nutrientes. Este caso es muy común en los suelos del valle del río Cauca, que presentan altos contenidos de Mg y su acumulación en la raíz tiende a bloquear el ingreso a ella de K y otros nutrientes.

Cuadro 3. Contribución de cada forma de aporte de nutrientes a la raíz para el cultivo de maíz.

Nutriente	Unidad de medida	Requerimiento para 12.5 t/ha de maíz	Porcentaje suministrado por		
			Flujo másico	Intercepción	Difusión
N	kg	102.2	99	1	0
P	kg	20.4	4	2	94
K	kg	90.8	20	2	78
Ca	kg	22.7	440	120	0
Mg	kg	25.0	280	27	0
S	g	11.4	94	4	2
Cu	g	50	400	8	0
Zn	g	182	30	25	45
B	g	114	350	8	0
Fe	g	1135	40	8	52
Mn	g	4720	130	25	0
Mo	g	5	200	8	0

La textura de los suelos y su relación con la fertilización

Desde el punto de vista físico, la textura del suelo determina su capacidad para retener humedad. Así, a mayor contenido de arcillas mayor porosidad del suelo y mayor cantidad de agua retenida, pero una parte de ella puede estarlo a tensiones tan altas que las plantas no pueden absorberla. La textura del suelo influye en el movimiento del agua en él y por lo tanto en el movimiento de los iones en la solución del suelo. Desde el punto de vista químico, el tipo de arcillas y su cantidad determinan el intercambio, la retención y la disponibilidad de los cationes.

El pH del suelo

El pH de una solución se define como el logaritmo común negativo, denotado por 'p', de la actividad del ion hidrógeno y no de la concentración molar del ion hidrógeno, como comúnmente se cree. Por lo tanto, el electrodo de pH provee una medida de la actividad real del protón (H^+) en solución (Essington, 2004).

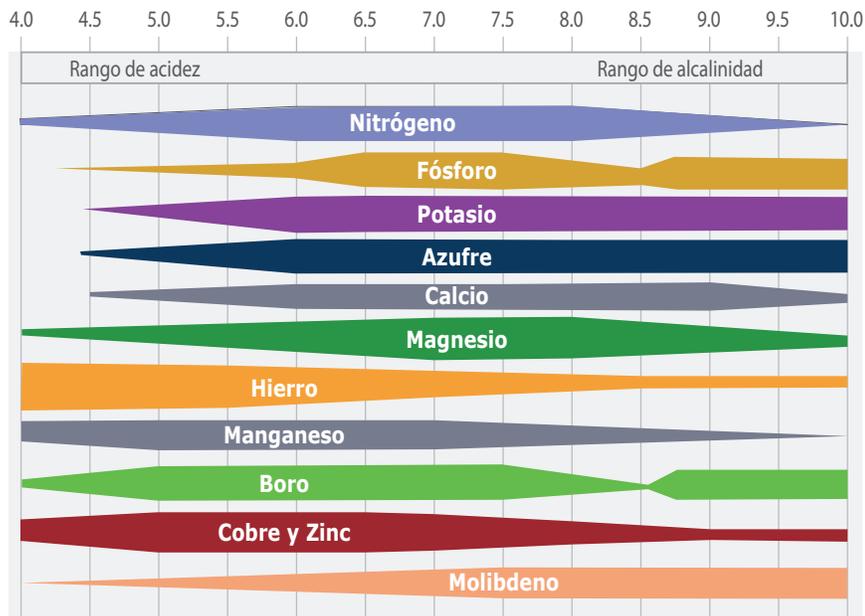
- **Acidez activa.** Se expresa como la concentración de H^+ y Al^{+3} en la solución del suelo, y se determina midiendo con un pehachímetro y un electrodo de vidrio el pH en pasta saturada o en una mezcla más diluida en agua. En el resultado de un análisis de suelo el pH representa la acidez en la solución del suelo.
- **Acidez potencial.** La medida del pH del suelo (acidez activa) es un buen indicador de la acidez del suelo pero no establece su acidez potencial, que es la representada por el Al. Esta acidez potencial, como su nombre lo indica, es la que podría alcanzar un suelo en determinadas condiciones.

Acidez y alcalinidad de los suelos y su relación con la nutrición

La acidez del suelo es un fenómeno natural consecuencia de la meteorización, durante la cual se producen ácidos orgánicos y ácido carbónico que promueven la hidrólisis (disolución) de los minerales del suelo. Como resultado de este proceso, en regiones donde la precipitación excede la evapotranspiración los cationes básicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ y Na^+) y el silicio son solubilizados y lixiviados del suelo. Otros productos de la meteorización, tales como el Al^{+3} y el Fe^{+3} solubles, se hidrolizan y liberan protones cuando forman productos de la hidrólisis ($AlOH^+$ y $Al[OH]_2^+$) y minerales accesorios como la gibbsita y la goethita. Estas reacciones de hidrólisis, acopladas con el desplazamiento de cationes no-acídicos (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ y Na^+) desde el complejo de cambio por Al^{+3} , $AlOH^+$ y $Al(OH)_2^+$, son procesos que tienden a incrementar la acidez del suelo (Essington, 2004).

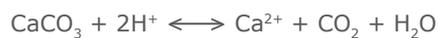
En la figura siguiente se puede observar gráficamente la relación entre el pH del suelo y la disponibilidad de los principales nutrimentos esenciales.

Relación entre el pH del suelo y la disponibilidad de los principales nutrientes esenciales



Encalamiento de suelos ácidos

Las reacciones del encalamiento comienzan con la neutralización del ion H^+ en la solución del suelo añadiendo una base, usualmente $CaCO_3$ (cal agrícola), lo que produce en el suelo la siguiente reacción:



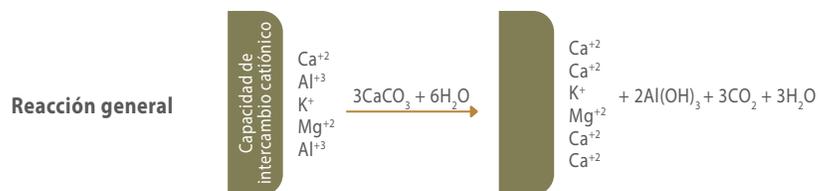
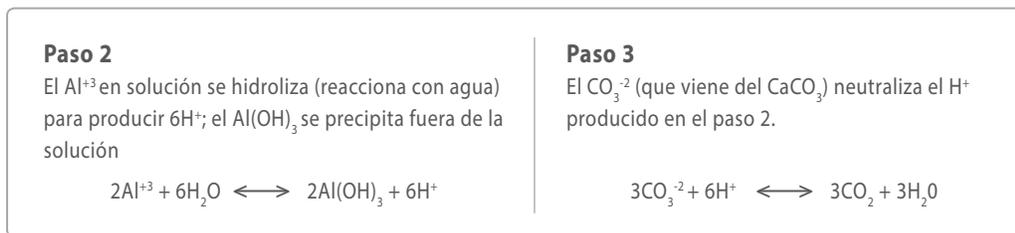
La rápida reacción de $2H^+ + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + H_2O$ neutraliza el ion H^+ en la solución del suelo. El ion Al^{+3} intercambiable se desorbe del complejo de cambio a medida que el ion Ca^{+2} en solución aumenta debido a la disolución del $CaCO_3$. Dos iones Al^{+3} del complejo de cambio son reemplazados por tres iones Ca^{+2} de la solución. Una vez en solución el ion Al^{+3} se hidroliza para producir más iones H^+ , los cuales son neutralizados por CO_3^{2-} (carbonato), con lo cual el pH y la saturación de bases se incrementan.

La mayoría de la acidez intercambiable ocurre como Al^{+3} y su reacción se puede representar como muestra la figura siguiente.

La velocidad de la reacción está directamente relacionada con la tasa a la cual los iones H^+ son neutralizados en la solución del suelo.

En el valle del río Cauca es relativamente poca el área en la que se justifique realizar encalamiento ya que, en general, en los suelos de pH bajo que existen no hay presencia de iones Al^{+3} en concentraciones que causen daño al cultivo.

Neutralización de la acidez del suelo con adición de cal



Acidificación de suelos calcáreos o básicos

Se definen como suelos calcáreos aquellos de pH básico con presencia de carbonato de calcio (CaCO_3). Los suelos alcalinos están generalmente asociados a regiones de baja precipitación en las que el agua puede ser la principal limitante. Desde el punto de vista químico, la mayor limitante de los suelos básicos es la baja disponibilidad de micronutrientes. La nivelación de suelos que se realiza para facilitar la irrigación superficial puede exponer subsuelo calcáreo, lo que afecta negativamente el desarrollo de los cultivos. La acidificación de suelos calcáreos suele ser difícil y costosa. Para disminuir el pH del suelo, el CaCO_3 debe ser disuelto o neutralizado añadiendo materiales ácidos o formadores de ácido, pero en la mayoría de las situaciones de cultivos en campo la reducción del pH a través de la neutralización del CaCO_3 no es práctica. Por ejemplo, la cantidad de azufre elemental para neutralizar un suelo a una profundidad de 18 cm con solamente el 2% de CaCO_3 podría ser 16 t/ha. Esta es una enorme cantidad de mineral y puede ser antieconómica. Una de las opciones cuando se hace totalmente necesario aplicar enmiendas al suelo es hacerlo en bandas en lugar de tratar toda la masa de suelo; de esta forma se puede reducir notablemente la cantidad de enmienda por unidad de área. En el Cuadro 4 se presentan la clasificación y parámetros de los suelos afectados por sales (suelos básicos).

Cuadro 4. Clasificación y propiedades de los suelos afectados por sales.

Clasificación	CE _{es} (mmho/cm)	pH del suelo	Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI)	Condición física
Salino	>4	<8.5	<15	Normal
Sódico	<4	>8.5	>15	Pobre
Salino-sódico	>4	<8.5	>15	Normal

Referencias bibliográficas

- Essington, M.E. 2004. Soil and Water Chemistry: An integrative approach. CRC Press, Boca Ratón, Florida. 534 p.
- Havlin, J.L.; Tisdale S.L.; Nelson W.L. y Beaton J.D. 2013. Soil fertility and Fertilizers: An introduction to nutrient management. Octava edición. Pearson. New Jersey. 516 p.
- Wallender, W. y Tanji, K. (Eds.) 2012. Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE (American Society of Civil Engineers) y EWRI (Environmental Water Resources Institute). 1094 p.



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia

Cenicaña es una corporación privada, sin ánimo de lucro, fundada en 1977 por iniciativa de la Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, Asocaña, y financiada con donaciones directas de los ingenios azucareros y los proveedores de caña localizados en el valle del río Cauca.

Su misión es contribuir al desarrollo, la competitividad y la sostenibilidad del sector agroindustrial de la caña de azúcar de Colombia, mediante la generación de conocimiento y la innovación tecnológica, a través de la investigación, la transferencia de tecnología y la prestación de servicios especializados, con base en un sistema integrado de gestión, para que el sector sea reconocido por sus aportes socioeconómicos y la conservación ambiental de las zonas productoras de caña de azúcar.

Así, el Centro favorece la innovación en la agroindustria gestionando proyectos de investigación y desarrollo acordes con la planeación estratégica del sector productivo. Dirige programas de investigación en variedades, agronomía y procesos de fábrica, y servicios especializados en información y documentación, tecnología informática, análisis económico y estadístico, cooperación técnica y transferencia de tecnología.

En sus funciones de apoyo sectorial, Cenicaña administra la Red Meteorológica Automatizada y la Red PM-10 de la agroindustria azucarera en el valle del río Cauca. Atiende solicitudes de importación de variedades en Colombia y presta servicios de propagación y multiplicación de variedades, análisis de suelo y tejido foliar, inspección fitopatológica en campo y laboratorio, diagnóstico de enfermedades de la caña de azúcar, e información y documentación.

Estación Experimental, vía Cali-Florida km 26. San Antonio de los Caballeros, Florida (Valle del Cauca, Colombia).



La colección de materiales para la transferencia de tecnología en la agroindustria de la caña de azúcar está dirigida a los profesionales de distintas disciplinas vinculados con el sector azucarero colombiano que en sus competencias de rol ejercen como facilitadores de la transferencia tecnológica y la adopción, particularmente a quienes planifican, ejecutan y evalúan las actividades de capacitación en las que participan los usuarios finales de la tecnología en el Programa de Aprendizaje y Asistencia Técnica (PAT). Algunos materiales de la colección están dirigidos a los participantes en la capacitación, y les serán entregados por los facilitadores.



www.cenicana.org/pat



Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
Calle 58N No. 3BN-110 Cali, Colombia
www.cenicana.org