

ACIDEZ Y ENCALADO DE LOS SUELOS

LA ACIDEZ DEL SUELO

Un ácido es una sustancia que tiende a entregar protones (iones hidrógeno). Por otro lado, una base es cualquier sustancia que acepta protones. La acidez de una solución está determinada entonces por la concentración de iones hidrógeno (H^+). Haciendo uso de estos principios químicos, la acidez en el suelo se determina midiendo la concentración de H^+ en la solución del suelo y se expresa con un parámetro denominado potencial hidrógeno (pH).

El pH del suelo se define como la inversa del logaritmo de la concentración de iones H^+ de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$pH = \log \frac{1}{(H^+)}$$

Así a pH 7.0 por ejemplo, la concentración de iones H^+ es igual a 0.0000001 moles de H^+ por litro. La inversa de 0.0000001 es igual a 10000000 y el log de este número es 7.

La escala del pH cubre un rango que va de 0 a 14. Un valor de 7.0 es neutro (igual número de iones H^+ y OH^- en la solución) mientras que valores menores que 7.0 son ácidos y valores mayores que 7.0 son básicos.

El significado práctico de la expresión logarítmica de los valores del pH es que a cada unidad de cambio en pH en el suelo corresponde un incremento de 10 veces en la cantidad de acidez o basicidad del suelo. En otras palabras, un suelo con pH 5.0 tiene 10 veces más H^+ activo que un suelo con pH 6.0. Esto tiene un enorme significado en la nutrición de los cultivos y en el manejo efectivo de los fertilizantes. En la Tabla 1 se presenta el grado de acidez o basicidad comparado con el pH neutro (7.0).

Tabla 1. pH del suelo y el grado de acidez o basicidad.

pH del suelo		Acidez / Basicidad comparadas con pH 7.0
9.0	Basicidad	100
8.0		10

7.0	Neutro	

6.0	Acidez	10
5.0		100
4.0		1000

MEDICION DE LA ACIDEZ DEL SUELO

La acidez del suelo se puede medir de dos formas diferentes. Una de ellas es con el uso de papel indicador como un diagnóstico rápido en el campo. Este método debe ser utilizado por operadores con experiencia para evitar errores, pero es un buen índice de campo que permite hacer un diagnóstico más o menos aproximado del pH del suelo.

El método más preciso y ampliamente utilizado hace uso del potenciómetro. Con este método se determina el pH del suelo al poner en contacto una suspensión de suelo y agua destilada con el electrodo de vidrio del potenciómetro que lee el resultado en la escala calibrada del aparato.

NATURALEZA DE LA ACIDEZ DEL SUELO

La acidez del suelo tiene varias fuentes, entre las más importantes se pueden citar:

Materia Orgánica

La materia orgánica del suelo contiene grupos carboxílicos y fenólicos activos que se disocian liberando iones H^+ a la solución del suelo. El contenido de materia orgánica varía de sitio a sitio y por lo tanto su contribución a la acidez del suelo es también variable.

Por otro lado, la materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos produciendo un constante suplemento de CO_2 que fácilmente se transforma a ácido carbónico (H_2CO_3) de acuerdo a la siguiente reacción:



El H_2CO_3 forma bicarbonatos que fácilmente se combinan con las bases intercambiables del suelo (K, Ca, Mg) y estos compuestos se lavan del perfil llevando de esta forma al suelo a condiciones que desarrollan acidez.

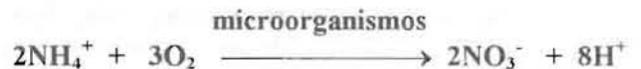
Remoción de Nutrientes por la Planta

La acidez del suelo se incrementa también como producto de la absorción de cationes. La planta al absorber cationes libera H^+ para mantener el equilibrio. Esto contribuye a la reducción del pH del suelo.

Fertilizantes Nitrogenados

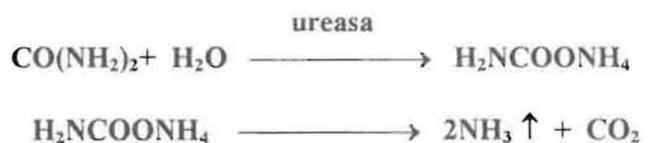
Los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio (NH_4^+) incrementan la acidez del suelo a menos que la planta absorba NH_4^+ directamente. Ejemplos de estos fertilizantes son el sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) y la urea $CO(NH_2)_2$.

El sulfato de amonio aplicado al suelo se disocia en los iones NH_4^+ y SO_4^{2-} . El NH_4^+ liberado en esta forma es convertido a nitrato (NO_3^-) a través de la oxidación biológica del NH_4^+ . El proceso que hace posible esta transformación se denomina nitrificación. Este proceso libera H^+ a la solución del suelo de acuerdo a la siguiente reacción global:



La nitrificación requiere oxígeno por lo tanto es necesario que el suelo se encuentre bien aerado para que el proceso tenga lugar.

La utilización de urea produce también acidificación del suelo aun cuando las reacciones iniciales son diferentes. Después de la aplicación al suelo, la urea es atacada por la enzima ureasa facilitando su hidrólisis y formando carbamato de amonio que es un compuesto inestable. Esta reacción eleva el pH en la inmediata vecindad del gránulo a valores mayores que 8.0. En este ambiente alcalino el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoníaco (NH_3) y dióxido de carbono (CO_2). Estas reacciones se describen a continuación:



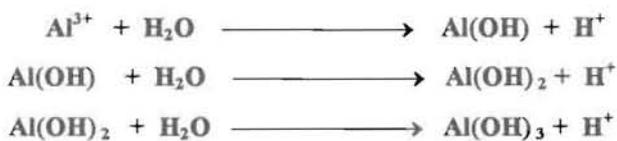
El NH_3 formado al final de estas reacciones es un gas que se volatiliza fácilmente de la superficie del suelo, perdiéndose de esta forma apreciable cantidad de nitrógeno del sistema. El NH_3 en contacto con agua se transforma en amonio (NH_4^+) permaneciendo en esta forma estable en el suelo. Es por esta razón que es aconsejable el incorporar la urea en el suelo para evitar volatilización.

El NH_4^+ formado después de la hidrólisis de la urea pasa por los mismos procesos de oxidación biológica o nitrificación, al igual que el NH_4^+ de otras fuentes nitrogenadas. Como ya se discutió anteriormente este proceso lleva inevitablemente a la acidificación del suelo.

Es importante aclarar que la mineralización de la materia orgánica también produce NH_4^+ como producto final del proceso de descomposición. Este NH_4^+ contribuye de igual forma a la acidificación del suelo después de la nitrificación.

Aluminio Intercambiable

Se ha reconocido ampliamente que uno de los factores principales en el desarrollo de la acidez del suelo es a la presencia de aluminio (Al^{3+}) en la solución del suelo. Los iones Al^{3+} desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxialumínicos. La hidrólisis de las formas monoméricas se ilustra en las siguientes reacciones:



Cada una de estas reacciones libera H^+ y baja el pH. Este incremento en acidez promueve la presencia de más Al^{3+} listo para reaccionar nuevamente. Además el Al^{3+} es un metal muy tóxico para los cultivos.

CLASIFICACION DE LA ACIDEZ

La acidez proveniente de las fuentes mencionadas anteriormente se puede clasificar de la siguiente forma:

Acidez activa: Hidrógeno (H^+) disociado en la solución del suelo y proveniente de diferentes fuentes.

Acidez intercambiable: Hidrógeno y aluminio intercambiables (H^+ , Al^{3+}) retenidos en los coloides del suelo por fuerzas electrostáticas.

Acidez no intercambiable: Hidrógeno en enlace covalente en la superficie de los minerales arcillosos de carga variable.

Acidez potencial: Acidez intercambiable + acidez no intercambiable.

ENCALADO

El encalado es la operación por la cual se aplica al suelo compuestos de calcio o calcio y magnesio que son capaces de reducir la acidez e incrementar el pH.

Existen varios materiales que son capaces de reaccionar en el suelo y elevar el pH. Entre los más importantes se pueden citar: óxido de calcio, hidróxido de calcio, calcita y dolomita.

Oxido de Calcio

El óxido de calcio (CaO), también conocido como cal viva, es un polvo blanco muy difícil y desagradable de manejar. Se fabrica calcinado al horno piedra caliza y la pureza depende del material primario. Cuando se aplica al suelo reacciona de inmediato de manera que este material es ideal cuando se desean resultados rápidos (iguales resultados se obtienen con el hidróxido de calcio). Este material debe mezclarse inmediatamente con el suelo debido a que se endurece rápidamente haciéndose inefectivo.

Hidróxido de Calcio

El hidróxido de calcio [Ca(OH)_2] se conoce también como cal apagada o cal hidratada. Es una sustancia blanca, polvorosa difícil y desagradable de manejar. Se prepara hidratando el CaO . Este material reacciona en el suelo rápidamente.

Calcita y Dolomita

El carbonato de calcio cristalino (CaCO_3) es conocido como calcita mientras que el carbonato doble de calcio y magnesio ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) se denomina dolomita. La calidad de estos materiales depende del contenido de impurezas como arcillas por ejemplo. El valor de neutralización varía entre 65 y algo más del 100%. El valor de neutralización del carbonato de calcio puro ha sido establecido como de 100% y sirve como punto de referencia para calificar el valor de

neutralización de las cales. Como regla general el valor de neutralización de la mayoría de las cales está entre 90 y 98% debido a impurezas. Existen depósitos de calcita y dolomita en varios países de América Latina y a menudo la extracción se hace en minas a cielo abierto.

REACCIONES DE LA CAL EN EL SUELO

Los mecanismos de reacción de los materiales en calantes permiten la neutralización de los iones H^+ en la solución del suelo por medio de los iones OH^- producidos al entrar en contacto la cal con el agua del suelo. Es por esta razón que la cal es efectiva solamente cuando existe humedad en el suelo. Las reacciones básicas de la cal en el suelo pueden ser ilustradas con el caso del carbonato de calcio o calcita. Estas reacciones se presentan a continuación:



La tasa de las reacciones arriba indicadas y por lo tanto la disociación del $CaCO_3$ está directamente relacionada con la tasa a la cual los iones OH^- son removidos de la solución del suelo a través de la neutralización del H^+ y la formación de H_2O . Mientras exista H^+ en la solución del suelo el Ca^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- y H_2CO_3 continuarán apareciendo en la solución. En esta forma el pH aumenta debido a que disminuye la concentración de H^+ en el suelo.

Es interesante el observar que el ion calcio (Ca^{2+}) proveniente de la disolución del $CaCO_3$ no interviene en las reacciones de incremento del pH. Este catión pasa simplemente a ocupar sitios de intercambio en la superficie de los coloides del suelo y servirá como nutriente de las plantas.

Por otro lado, también es interesante el notarse que es el ion carbonato (CO_3^{2-}) el que realmente eleva el pH al hidrolisarse y producir iones OH^- . Además es importante indicar que el ion CO_3^{2-} se disipa como CO_2 después de las reacciones de hidrólisis. Esta es la razón por la cual el efecto de la cal se limita al lugar de aplicación.

El efecto final de las reacciones de la cal reduce la acidez del suelo (incrementa el pH) al convertir el exceso de H^+ en H_2O . Sin embargo, es muy importante observar que el efecto del encalado va más allá de estas reacciones. El incremento de pH permite la precipitación del Al^{3+} como $Al(OH)_3$, que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al^{3+} en las plantas y la principal fuente de iones H^+ .

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES PARA ENCALADO

Un factor importante en el encalado de los suelos es el grado de fineza o tamaño de las partículas de la cal a utilizarse. Esto se debe a que la velocidad de la reacción de la cal en el suelo depende de la superficie del material en contacto con el suelo. Mientras más fino es el material tiene más superficie de contacto y reacciona más rápido.

Materiales como el óxido de calcio y el hidróxido de calcio son polvos finos por naturaleza y no tienen problema de tamaño de partícula al aplicarse al suelo. Cuando se usa calcita o dolomita el problema es completamente diferente.

Cuando se utiliza calcita o dolomita es necesario asegurarse de que el material sea molido a un tamaño de partícula adecuado. Las partículas de cal gruesas reaccionan más lentamente mientras que las partículas finas reaccionan más rápidamente y en forma completa. El costo de la cal aumenta con el grado de fineza de la molienda. Lo ideal es utilizar un material que requiera un mínimo de molido y que a la vez tenga una cantidad suficiente de material fino que permita un cambio rápido en el pH. El mejor tamaño de partícula es aquel que pasa una malla mayor a 60 mesh.

APLICACION DE LA CAL

Las reacciones de neutralización de la cal exigen que el material se solubilice previamente lo que determina que se debe aplicar la cal en un suelo húmedo antes de la siembra. Si no existe humedad en el suelo las reacciones de neutralización no se producen.

La cal se mueve muy poco en el suelo debido a que el ion CO_3^{2-} se disipa como CO_2 después de las reacciones y los efectos benéficos de la cal ocurren solamente en el zona de aplicación. Para que la cal sea efectiva es necesario incorporar y mezclar completamente el material en la capa arable.

En algunos sistemas de cultivo como los pastos y cultivos perennes, la incorporación solamente se puede hacer al inicio del cultivo. Una vez que el cultivo está establecido solamente se puede aplicar cal a la superficie esperando un efecto muy parcial del encalado.

En el caso del cafeto establecido, la aplicación de cal deberá hacerse en la superficie, solamente en la banda de fertilización, antes del inicio de las lluvias para que los efectos del encalado se vean en las primeras brotaciones. La acidificación ocurre en la banda o corona de fertilización y la aplicación superficial de cal, aun cuando en forma más lenta, eleva el pH en la zona donde se encuentra la mayor actividad radicular que está a una profundidad de 10 a 15 cm.

DETERMINACION DE LOS REQUERIMIENTOS DE CAL

Aun cuando el pH es un excelente indicador de la acidez, este parámetro no determina el requerimiento o cantidad de cal necesaria para llegar a determinado rango de pH en el sistema de producción que se está utilizando. Cuando se mide el pH solamente se determina la acidez activa pero para determinar los requerimientos de cal es también necesario considerar la acidez potencial retenida en los coloides minerales y orgánicos del suelo.

Los suelos dominados por minerales arcillosos de tipo 2:1 (montmorillonita, vermiculita, illita) que predominan en las zonas templadas del mundo, pero que también están presentes en zonas tropicales y subtropicales, se comportan de forma diferente de los típicos suelos tropicales rojos (Ultisoles y Oxisoles dominados por óxidos e hidróxidos de Fe y Al y caolinita) y de los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles) de particular importancia en amplias zonas de América Central y América del Sur. Estas importantes diferencias determinan que método debe utilizarse para evaluar los requerimientos de cal.

Requerimientos de cal en suelos dominados por arcillas de tipo 2:1

En los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1, la reducción en saturación de bases (pérdida de K, Ca y Mg) desarrolla acidez. Este incremento en acidez conduce a la consecuente ruptura de la estructura de los cristales y a la liberación de Al. Estos suelos, por tener arcillas de superficies no muy reactivas, pueden fácilmente encalarse hasta llegar a pH 7.0, valor alrededor del cual se obtienen los mejores rendimientos de los cultivos. El incremento de pH logrado con el enca-

lado incrementa poco o nada la CIC del suelo (suelos de carga permanente).

Un método común para determinar las necesidades de cal en suelos de carga permanente utiliza soluciones tampón. Este método se basa en el cambio de pH de una suspensión suelo-solución tampón comparada con el pH de una suspensión suelo-agua. Un suelo ácido reducirá el pH de la solución tampón y esta reducción está en relación al pH original y la resistencia de suelo al cambio de pH. Estos cambios de pH se pueden calibrar para determinar las necesidades de cal necesarias para llevar al suelo a un pH determinado. Un ejemplo se presenta en la Tabla 2.

En suelos ácidos de carga variable (Oxisoles, Ultisoles y Andisoles) esta metodología recomienda cantidades muy altas de cal que no son necesarias. Métodos más adecuados para determinar los requerimientos de cal en suelos de carga variable se discuten a continuación.

Tabla 2. Cantidad de cal a añadirse de acuerdo al cambio de pH de la suspensión suelo-solución bufferizada (método SMP) y el pH al cual se requiere llegar (Fernandes de Sequeira, et al., 1987).

Índice SMP	pH en agua a obtenerse		
	5.5	6.0	6.5
	cal t/ha		
4.4	15.0	21.0	29.0
4.5	12.5	17.3	24.0
4.6	10.9	15.1	20.0
4.7	9.6	13.3	17.5
4.8	8.5	11.9	15.7
4.9	7.7	10.7	14.2
5.0	6.9	9.7	12.9
5.1	6.2	8.8	11.7
5.2	5.5	8.0	10.6
5.3	4.9	7.2	9.6
5.4	4.4	6.5	8.7
5.5	3.8	5.8	7.9
5.6	3.3	5.1	7.0
5.7	2.8	4.5	6.2
5.8	2.3	3.9	5.5
5.9	1.9	3.3	4.8
6.0	1.4	2.8	4.1
6.1	1.0	2.2	3.4
6.2	0.6	1.7	2.7
6.3	0.2	1.2	2.1

Requerimientos de cal en Ultisoles y Oxisoles

En suelos tropicales los métodos descritos anteriormente para determinar los requerimientos de cal no funcionan satisfactoriamente. El caso de los típicos suelos tropicales rojos (Ultisoles y Oxisoles) es diferente. Los minerales arcillosos de estos suelos, que han sufrido ya un proceso severo de meteorización, son estables hasta valores de pH tan bajos como 5.0. En esta forma el Al se encuentra fijo en la partícula de arcilla y no amenaza el crecimiento de la planta hasta que el pH del suelo llega a valores donde los óxidos, hidróxidos y caolinita se disuelven y liberan Al a la solución del suelo. Generalmente esto ocurre a pH's entre 5.0 a 5.3. Cuando esto ocurre es aconsejable elevar el pH a valores de alrededor de 5.5 lo que permite la precipitación del Al y un apreciable incremento en CIC (suelos de carga variable) como se presenta en la Tabla 3. Este incremento en pH es suficiente para el adecuado crecimiento y rendimiento de los cultivos (Tabla 4).

Siguiendo este concepto, se puede predecir los requerimientos de cal para la mayoría de los suelos tropicales aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{CaCO}_3 \text{ equivalente (t/ha)} = \text{Factor} \times \text{cmol Al/kg de suelo}$$

El factor utilizado puede ser 1.5 o 2.0 de acuerdo con las características del cultivo y el tipo de suelo. El valor del factor puede ser modificado y afinado de acuerdo a la experiencia del técnico trabajando en una área específica.

El principal objetivo de este método es el utilizar solamente la cal necesaria para neutralizar todo el Al. Por otro lado existen cultivos tolerantes al Al y que pueden crecer y producir satisfactoriamente a moderadas tasas de saturación de Al en la fase de intercambio. Como en este caso no es necesario precipitar todo el Al se pueden utilizar cantidades aun menores de cal que solamente reducirán la saturación de Al a los valores requeridos.

Este método de determinación de los requerimientos de cal es muy difundido en áreas tropicales de suelos rojos pero tiene como principal desventaja el hecho de que la neutralización del Mn se produce a 0.5 unidades de pH por encima de aquel necesario para la neutralización de Al. Cuando los suelos presentan también problemas de toxicidad de Mn se debe tomar en cuenta este factor en la determinación de los requerimientos de cal.

Tabla 3 Efecto del encalado en los parámetros químicos en un Ultisol rojo de Panamá*.

Tratamiento	pH	Ca	Mg	K	Al	CIC efectiva
						- cmol (+)/kg de suelo** -
Sin cal	4.9	1.79	1.12	0.11	2.15	5.18
Cal (4 t/ha)	5.8	7.90	6.73	0.14	0.09	14.85

* Adaptado de Name (1992).

** cmol (+)/kg suelo = meq/100 g de suelo.

Tabla 4. Efecto del encalado en el rendimiento de varios cultivos y en el pH del suelo en Oxisoles de Brasil.

Soya			Trigo			Maíz	
CO ₃ t/ha	pH	Rend. kg/ha	CaCO ₃ t/ha	pH	Rend. kg/ha	pH	Rend. kg/ha
0	4.6	1943	0	4.7	1324	3.9	1150
3.5	4.9	2514	3.5	5.0	2363	4.5	4090
			7.0	5.2	3031	4.7	4420
						5.3	5340

Adaptado de Kamprat (1990).

Existe otra tendencia generalizada para determinar los requerimientos de cal en suelos tropicales. Este método da mucha importancia a la saturación de bases del suelo. Si bien se ha determinado que la saturación de bases no ejerce marcada influencia en el rendimiento en suelos dominados por esmectitas (suelos de carga permanente) de alta CIC, este parámetro es muy importante en suelos viejos altamente meteorizados (Ultisoles y Oxisoles) de baja CIC que tienen muy poco contenido de Ca y Mg y donde el uso de la cal no solo es una enmienda sino también una fuente de estos nutrientes. En este tipo de suelos, la investigación ha demostrado, dentro de ciertos límites, que mientras más alta sea la saturación de bases mayor es la fertilidad del suelo y mayores son los rendimientos. De estos conceptos surgió el método para determinar los requerimientos de cal tomando en cuenta la saturación de bases a la cual se desea llevar al suelo

con la aplicación de la enmienda. En el caso del café la experiencia brasileña demuestra que se debe llevar al suelo a una saturación de bases de 60% para rendimiento óptimo.

De acuerdo con estos criterios los requerimientos de cal se pueden calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{R.C. (t/ha)} = (\text{CIC (SB2-SB1)})/100$$

de donde:

$$\text{CIC} = (\text{H}^+ + \text{Al}^{3+} + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}) \text{ en cmoles (+)/kg de suelo.}$$

$$\text{SB1} = \text{Porcentaje de Saturación de Bases.}$$

$$\text{SB1} = \frac{\text{K}^+ + \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}}{\text{CIC}} \times 100$$

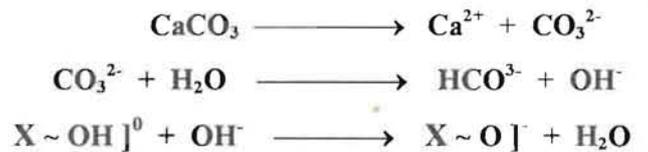
$$\text{SB2} = \text{Porcentaje de Saturación de Bases a la cual se desea llegar.}$$

Requerimientos de cal en Andisoles

Los Andisoles (suelos derivados de ceniza volcánica) tienen una alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) y una moderada CIC y estos factores hacen que la determinación de los requerimientos de cal en estos suelos sea más complicada. La intensidad de la capacidad tampón varía de un sitio a otro de

acuerdo a los factores que controlan la meteorización de la ceniza como la altitud, precipitación, temperatura y edad del material. Por esta razón no existe una regla simple para evaluar los requerimientos de cal en estos suelos. El uso del criterio del Al intercambiable o la saturación de bases en ciertos casos subestima la necesidad de cal como se observa en los datos presentados en la Tabla 5.

La alta capacidad tampón de los Andisoles se debe a que las arcillas resultantes de la meteorización de las cenizas volcánicas (alófana, imogolita y complejos humus-Al) tienen una superficie muy reactiva. En este caso los OH⁻ producidos por hidrólisis del CO₃ crean carga en la superficie de las arcillas por deprotonización (pérdida de H⁺) y consecuentemente no incrementan el pH de la solución del suelo pero incrementan la CIC (carga variable). Estas reacciones se describen a continuación:



Esta resistencia al cambio de pH de los suelos de carga variable obligaría a utilizar cantidades muy altas de cal para llegar a pH 7.0. Obviamente esto no es necesario y solamente es conveniente el elevar el pH hasta valores un poco más arriba de lo necesario para precipitar el Al³⁺ (5.3-5.5). En Andisoles, la cantidad de cal necesaria para precipitar el Al o la magnitud de la capacidad tampón, varía con la edad y el estado de

Tabla 5. Efecto de la aplicación en cal en las propiedades químicas y el rendimiento de varios cultivos en un Andisol de Ecuador.

CaCO ₃ t/ha	pH	Al	K	Ca	Mg	CIC*	Rendimientos		
							Haba	Cebada	Avena
							t/ha		
0	5.0	2.1	0.31	2.54	0.36	6.0	13.9	2.2	3.6
1.5	5.1	1.5	0.29	2.58	0.36	6.2	12.8	3.0	4.4
3.0	5.2	1.6	0.29	3.30	0.44	6.6	17.1	2.9	4.3
4.5	5.2	1.5	0.31	4.67	0.48	7.2	18.9	3.7	4.4
6.0	5.3	0.6	0.24	4.67	0.45	7.2	19.2	3.9	4.7
9.0	5.4	0.4	0.28	4.60	0.46	7.4	21.5	3.9	5.2
12.0	5.4	0.2	0.30	5.59	0.55	8.4	21.6	4.1	4.8
15.0	5.8	0.1	0.30	8.60	0.80	10.7	21.0	4.3	4.7

* CIC medida con una sal indiferente

meteorización de la ceniza volcánica y por esta razón es necesario conducir experimentos simples que determinen exactamente los requerimientos de cal de un sitio específico. En el caso del ejemplo de la Tabla 5, la capacidad tampón del suelo es muy alta y es necesario aplicar 6 t/ha de cal para precipitar el Al^{3+} y producir buenos rendimientos de cultivos susceptibles al Al^{3+} . En otros Andisoles la capacidad tampón es menor y en consecuencia se debe aplicar menor cantidad de cal.

BENEFICIOS DEL ENCALADO

Toxicidad de Aluminio

El mayor efecto benéfico del encalado de suelos ácidos es la reducción en la solubilidad del Al y Mn. Estos dos elementos, aun cuando estén presentes en bajas concentraciones, son tóxicos para la mayoría de los cultivos. El exceso de Al interfiere la división celular en las raíces de la planta y esta es la razón por la cual el sistema radicular de plantas creciendo en suelos ácidos es atrofiado y pobremente desarrollado. La presencia de altas concentraciones de Al en la solución del suelo inhiben también la absorción de Ca y Mg por las plantas. Cuando se añade cal al suelo, el incremento en pH induce la precipitación del Al y Mn como compuestos insolubles removiéndolos de esta forma de la solución del suelo.

Disponibilidad de Fósforo

La relación entre el pH del suelo y el tipo de arcilla es importante para diferenciar los mecanismos envueltos en la disponibilidad del P.

Aquellos suelos dominados por arcillas de tipo 2:1 (esmectitas) no tienen una superficie reactiva y retienen modestas cantidades de P en la superficie de las arcillas. La mayor causa de pérdida de disponibilidad de P (fijación) en estos suelos se debe a las reacciones del P con el Al y Fe. La reducción en pH (incremento de acidez) permite el rompimiento de la estructura de los minerales arcillosos y en consecuencia libera Al y Fe. El P aplicado al suelo reacciona con estos elementos y se precipita como fosfatos insolubles de Al y Fe haciendo que el P sea menos disponible. En este caso, las

formas más solubles o disponibles de P existen dentro de un rango de pH que va de 6.0 a 7.0 y un adecuado programa de encalado es esencial para reducir la fijación de P.

Los mecanismos de fijación en los suelos altamente meteorizados de los trópicos (Ultisoles y Oxisoles dominados por óxidos e hidróxidos de Al y Fe y caolinita) y los suelos derivados de ceniza volcánica (Andisoles) son diferentes. La capacidad de fijación en la mayoría de estos suelos está relacionada con la alta reactividad y afinidad por P de las superficies de las arcillas presentes en estos suelos. Este proceso retiene apreciable cantidad de P en un rango de pH de 5.0 a 7.0.

En los suelos tropicales viejos el Al y Fe presentes en los minerales arcillosos son estables hasta pH's bajos. Cuando el pH del suelo llega a valores menores que 5.3 el Al y Fe son liberados a la solución del suelo y reaccionan rápidamente con el P para formar compuestos insolubles que se precipitan incrementando de esta manera el proceso total de fijación.

El efecto del encalado en suelos tropicales generalmente lleva a confusión con respecto a la disponibilidad de P. La aplicación de cal en suelos tropicales corrige la toxicidad de Al y la deficiencia de Ca y la corrección de estos factores permite un incremento de la absorción de P aun cuando el encalado tiene muy poco efecto en la disponibilidad y fijación de P principalmente a pH's mayores de 5.0-5.5 donde la retención de P ocurre principalmente por reacciones en las superficies de las arcillas que tienen gran afinidad por este elemento (quemiadsorción). En la mayoría de los casos, una vez que se han controlado otras limitaciones del crecimiento, el efecto de la aplicación de cal en la reducción de la fijación de P es pequeño. Esta es la razón por la cual en suelos tropicales, independientemente del pH, son necesarias aplicaciones de aprecia-

Tabla 6. Respuesta a la aplicación de P en suelos de diferente capacidad de fijación.

Soya Ultisol (Venezuela)		Arroz seco Ultisol (Panamá)		Arroz seco Oxisol (Brasil)		Papas Andisol (Ecuador)	
P ₂ O ₅	Rend.	P ₂ O ₅	Rend.	P ₂ O ₅	Rend.	P ₂ O ₅	Rend.
kg/ha							
0	112	0	1035	0	1041	0	6000
75	1964	40	2316	50	3746	150	32600
150	2543	80	3019	100	4326	300	39800
		120	3668	150	4811	450	42500

bles cantidades de P para obtener buenos rendimientos. Ejemplos de la respuesta al P en Ultisoles, Oxisoles y Andisoles se presentan en la Tabla 6.

Fijación de Nitrógeno

En general, la acidez del suelo restringe la actividad de la mayoría de los microorganismos del suelo. El encalado mejora apreciablemente las condiciones del suelo y permite un adecuado desenvolvimiento de la actividad microbiana como se observa en el ejemplo del efecto del encalado en la población microbiana de suelos ácidos del Cerrado Brasileño presentado en la Tabla 7.

Dentro de la actividad microbiana, el proceso de fijación de N atmosférico es favorecido por el encalado. La actividad de las especies de rizobium en las leguminosas se restringe a pH's bajos. El encalado permite un mayor crecimiento de las leguminosas debido a que éstas pueden fijar una cantidad mayor de N gracias a las adecuadas condiciones para el desarrollo de la bacteria.

PROBLEMAS DE SOBRE ENCALADO

Por muchos años se consideró que el pH óptimo para la producción de cultivos estaba entre 6.5 y 7.0. Esto es cierto en Mollisoles, Vertisoles, Alfisoles (suelos dominados por esmectitas). Investigación ha demostrado que el encalar Oxisoles, Ultisoles y Andisoles de los trópicos a pH mayor de 6.0 es no solamente innecesario sino también riesgoso. El sobreencalado a valores de pH cercanos a 7.0 puede deprimir seriamente el rendimiento, causar deterioro de la estructura e inducir deficiencias de Zn, B y Mn. El encalado de los suelos tropicales debe ser suficiente para solamente neutralizar la mayoría del aluminio intercambiable lo cual lleva el pH a valores de 5.5 - 6.0.

Tabla 7. Efecto de la aplicación de cal en la población microbiana de suelos ácidos del Cerrado, Brasil (Malavolta, 1991).

	Suelo 1	Suelo 2	Suelo 3	Suelo 4
	----- millones de bacterias/g de suelo -----			
Sin cal	20	100	890	340
Con cal	480	190	1000	1290

Adaptado de Malavolta (1991).

BIBLIOGRAFIA

Espinosa, J. 1987. Efecto del encalado en las propiedades químicas de suelos ecuatorianos. Memorias del Primer Congreso Nacional de Ciencias de la Comunidad Científica Ecuatoriana. Quito, Ecuador.

Fernandes de Sequeira, et al., 1987. Recomendacoes de adubacao e calagem para os estados do Rio Grande do sul e Santa Catarina. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo. Passo Fundo, Brasil.

Fox, R. L. 1980. Soil with variable charge: Agronomic and fertility aspects. In theng, G. (ed). Soils with variable charge. Palmerston North, New Zealand Society of Soil Science.

Gullman, G. P., and G. Uehara. 1980. Charge characteristics of soils with variable and permanent charge minerals: 2. Experimental. Soil Sci. Soc. Am. J. 44:252-255.

Kamprat, E. 1990. Crop response to lime in soils of the tropics. In F. Adams (ed.) Soil acidity and liming. Agronomy Series No 12. American Society of Agronomy.

Malavolta, E., A. Lopes, y L. Guilherme. 1991. Fertilizantes, correctivos y productividad. Memorias de simposio "El Suelo y la Productividad". Itaguaí, Río de Janeiro.

Osaki, F. 1991. Calagem e adubacao. Campinas, SP. Instituto Brasileiro de Ensino Agrícola.

Parfitt, R. L. 1980. Chemical properties of variable charge soils. In: C. Theng. (ed). Soils with variable charge. Palmerston North, New Zealand Society of Soil Science.

Uehara, G., and G. Gillman. 1981. The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder, Colorado.

Uehara, G., and J. Keng. 1975. Management implications of soil mineralogy in La America. In: E. Bornemizsa and A. Alvarado (eds.). Soil Management in Tropical America. N.C. State Univ., Raleigh. ■