

# ACIDEZ Y ENCALADO DE LOS SUELOS



**IPNI**  
INTERNATIONAL  
PLANT NUTRITION  
INSTITUTE

---

# ACIDEZ Y ENCALADO DE LOS SUELOS

Primera Edición

**José Espinosa**

International Plant Nutrition Institute  
Casilla 17-17-980  
Quito - Ecuador

**Eloy Molina**

Centro de Investigaciones Agronómicas  
Universidad de Costa Rica  
Apartado 2060 - 1000  
San José - Costa Rica



**International Plant Nutrition Institute**

**1999**

---

## CONTENIDO

|                                                                    | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>La acidez del suelo</b>                                         | <b>1</b>    |
| Introducción                                                       | 1           |
| La acidez del suelo                                                | 1           |
| Medición de la acidez del suelo                                    | 1           |
| Naturaleza de la acidez del suelo                                  | 3           |
| Remoción de nutrientes                                             | 3           |
| Utilización de fertilizantes nitrogenados                          | 3           |
| Aluminio intercambiable                                            | 4           |
| Clasificación de la acidez                                         | 4           |
| Acidez activa                                                      | 4           |
| Acidez intercambiable                                              | 4           |
| Acidez no intercambiable                                           | 4           |
| Acidez potencial                                                   | 4           |
| <b>Encalado</b>                                                    | <b>5</b>    |
| Introducción                                                       | 5           |
| Materiales de encalado                                             | 5           |
| Oxido de calcio                                                    | 5           |
| Hidróxido de calcio                                                | 5           |
| Cal agrícola o calcita                                             | 5           |
| Dolomita                                                           | 5           |
| Oxido de magnesio                                                  | 5           |
| Magnesita                                                          | 6           |
| Arcillas calcáreas                                                 | 6           |
| Escorias industriales                                              | 6           |
| Calidad de los materiales de encalado                              | 6           |
| Pureza química                                                     | 6           |
| Tamaño de partículas                                               | 7           |
| Poder relativo de neutralización total                             | 7           |
| Reacción de la cal en el suelo                                     | 8           |
| Epoca y método de aplicación de la cal                             | 10          |
| Efecto residual de la cal                                          | 11          |
| Condiciones de suelo y clima                                       | 11          |
| Naturaleza química del material                                    | 14          |
| Tamaño de partículas                                               | 14          |
| Cultivo                                                            | 14          |
| Intensidad del cultivo                                             | 14          |
| <b>Determinación de los requerimientos de cal</b>                  | <b>17</b>   |
| Introducción                                                       | 17          |
| Estimación de las dosis de cal para neutralizar la acidez          | 17          |
| Requerimientos de cal en suelos dominados por arcillas de tipo 2:1 | 17          |
| Requerimientos de cal en Ultisoles y Oxisoles                      | 18          |
| Métodos de Cochrane, Salinas y Sánchez (1980)                      | 21          |
| Método de Van Raij (1991)                                          | 21          |
| Método combinado                                                   | 21          |

|                                                                         | <b>Pág.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Requerimientos de cal en andisoles                                      | 25          |
| Experimentos simples para determinar las necesidades de cal             | 25          |
| Aplicación de cal en suelos bajo siembra directa                        | 27          |
| <b>Beneficios del encalado</b>                                          | <b>29</b>   |
| Toxicidad de aluminio                                                   | 29          |
| Disponibilidad de fósforo                                               | 29          |
| Fijación de nitrógeno                                                   | 31          |
| Propiedades físicas del suelo                                           | 31          |
| Respuesta a la fertilización                                            | 32          |
| Importancia del magnesio en suelos ácidos                               | 33          |
| Problemas de sobreencalado                                              | 34          |
| <b>Uso del yeso agrícola como enmienda</b>                              | <b>36</b>   |
| Introducción                                                            | 36          |
| Uso del yeso en suelos ácidos                                           | 36          |
| Disolución y disociación del $\text{CaSO}_4$ en la superficie del suelo | 36          |
| Reacciones de intercambio y formación de pares iónicos                  | 37          |
| Formación de pares iónicos                                              | 37          |
| Lixiviación y disociación a profundidad                                 | 37          |
| Cantidad de yeso a utilizarse                                           | 37          |
| <b>Bibliografía</b>                                                     | <b>39</b>   |
| <b>Apéndice</b>                                                         | <b>42</b>   |

## LA ACIDEZ DEL SUELO

### INTRODUCCION

América Latina tiene una diversidad de suelos producto de la variedad de materiales parentales y condiciones ambientales sobre los cuales estos se desarrollaron. Una vasta área está cubierta por suelos tropicales típicos, sin embargo existen también suelos más jóvenes dominados por arcillas tipo 2:1 y suelos volcánicos derivados de cenizas y otros materiales volcánicos. Los suelos tropicales viejos (Oxisoles y Ultisoles) son naturalmente ácidos y los suelos derivados de otros materiales parentales pueden volverse ácidos después de períodos largos de uso intenso. En cualquier caso, es necesario controlar la acidez para poder incrementar y sostener los rendimientos agrícolas. Sin embargo, no se puede utilizar una sola estrategia debido a que las particulares características químicas de los diferentes tipos de suelos, como consecuencia de los diferentes materiales parentales, son las que finalmente determinan el método de control de acidez más efectivo. Por otro lado, los fundamentos químicos de la acidez en el suelo son los mismos para toda condición y conociendolos es posible planificar adecuadamente las estrategias de manejo de acidez que mejor se ajusten a las diferentes condiciones de suelo.

### 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 actividad de los iones hidrógeno ( $H^+$ ). Haciendo uso de estos principios químicos, la acidez en el suelo se determina midiendo la actividad del  $H^+$  en la solución del suelo y se expresa con un parámetro denominado potencial hidrógeno (pH).

Los ácidos se disocian poco y en las soluciones acuosas se presentan concentraciones muy bajas de iones  $H^+$ , tan bajas que es difícil presentarlas numéricamente en términos de molaridad. Por esta razón se define el pH en forma logarítmica. En realidad, el pH se define como el inverso del logaritmo de la actividad de iones  $H^+$  de acuerdo a la siguiente fórmula:

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

Así, a pH 7.0 por ejemplo, la actividad (concentración) de iones  $H^+$  es igual a 0.0000001 moles de  $H^+$  por litro. El inverso de 0.0000001 es igual a 10000000 y el logaritmo 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 del pH radica en el hecho de que cada unidad de cambio de pH corresponde a 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 mucho significado en la nutrición de los cultivos y en el manejo efectivo de los fertilizantes y otros insumos. La Tabla 1 compara el grado de acidez o basicidad con relación al pH neutro (7.0).

**Tabla 1. pH de una solución 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 utiliza papel indicador como un método de diagnóstico rápido en el campo (Foto 1). Este método debe ser utilizado por operadores con experiencia para evitar errores, pero es un buen índice de campo que permite hacer un diagnóstico bastante aproximado del pH del suelo.

El método más preciso y ampliamente utilizado usa el potenciómetro para medir el pH del suelo (Foto 2). Esta determinación se puede hacer en el laboratorio, pero actualmente existen equipos portátiles que miden



Foto 1. Método de determinación de pH por medio de papel indicador.

el pH con la misma precisión de los equipos convencionales utilizados en el laboratorio. En este caso se determina el pH al poner en contacto una suspensión, hecha con suelo y agua destilada, con un electrodo de vidrio y otro de referencia conectados a un equipo electrónico (potenciómetro) que mide la concentración de iones  $H^+$  e interpreta y entrega el resultado en la escala calibrada del aparato. En realidad, el aparato mide el pH de la suspensión al transformar la lectura de los milivoltios del potencial eléctrico generado cuando se colocan los dos electrodos en la suspensión de suelo. El potenciómetro se calibra con soluciones tampón de pH conocido.

Si bien esta determinación de laboratorio es bastante confiable existen ciertos factores que afectan la determinación del pH en suspensiones de suelo. Un error en la medición del pH se produce por el denominado efecto de suspensión. Cuando se mide el pH en suspensiones suelo-agua, los resultados son más bajos inmediatamente después de la agitación. Cuando se suspende la agitación, con los electrodos dentro de la suspensión y las partículas de suelo en proceso de decantación, el pH medido es gradualmente más alto debido a que los electrodos solamente miden la actividad del  $H^+$  presente en la solución de equilibrio. La medición de pH es también influenciada por la dilución de la suspensión suelo-agua. Cuanto más diluida es la suspensión mayor es el pH. Por esta razón se aconseja ser consistente en la relación suelo-agua utilizada en la determinación de pH. Las relaciones más comunes son 1:1 y 1:2.5 suelo-agua.

La acumulación de sales en el suelo también afecta las mediciones de pH. Esto puede ocurrir por procesos



Foto 2. Potenciómetro para medir pH en el laboratorio.

naturales como la mineralización de la materia orgánica o por la aplicación de fertilizantes. Esta es la razón por la que las lecturas de pH cambian cuando se toma una muestra de un mismo sitio en diferentes épocas del año. La presencia de sales reduce el pH debido al incremento de concentración de los electrolitos. Por esta razón, se aconseja determinar el pH de suelos que tienden a acumular sales en una solución de  $CaCl_2$  0.01M. Esto se debe a que el pH medido en  $CaCl_2$  no es afectado por la relación suelo-agua. La cantidad de  $CaCl_2$  adicionada es lo suficientemente alta como para nivelar el efecto de las sales que normalmente se encuentran en el suelo, sin embargo, la concentración de  $CaCl_2$  utilizada no es diferente a las concentraciones normalmente encontradas en la solución del suelo, en suelos de alta fertilidad y/o fertilizados abundantemente.

Otro factor que influye en la determinación del pH es la concentración (presión parcial) de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en la atmósfera. Antes que un efecto directo en la medición de pH de la suspensión suelo-agua, el efecto de la presencia de  $CO_2$  se observa en el pH del agua en el laboratorio y esto siempre causa confusiones. La atmósfera contiene alrededor de 0.03% de  $CO_2$  y éste se disuelve fácilmente en el agua utilizada en las determinaciones de laboratorio formando ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ). Por esta razón, aun el agua pura (destilada o deionizada) en equilibrio con el  $CO_2$  del aire tiene un pH de alrededor de 5.7. Sin embargo, en condiciones de laboratorio con mala ventilación o con presencia de muchas personas, la concentración de  $CO_2$  se incrementa y el pH del agua es aun más bajo.

Cuando se mide el pH en la solución suelo-agua, los dos componentes se mezclan mediante la agitación de modo que la solución entra en equilibrio con el CO<sub>2</sub> del aire, a la concentración presente en el laboratorio. Un suelo ácido tiene una capacidad mucho mayor de suplir H<sup>+</sup> que el CO<sub>2</sub> en el aire y por lo tanto este factor prácticamente no tiene efecto en la medición del pH de la solución. Solamente en suelos donde la concentración de H<sup>+</sup> es muy baja (pH mucho más alto que 7.0) y particularmente aquellos suelos que tienen CaCO<sub>3</sub> libre, el CO<sub>2</sub> del aire afecta apreciablemente la medición del pH.

## NATURALEZA DE LA ACIDEZ DEL SUELO

Existen varios procesos en el suelo que promueven la reducción del pH. Todos estos procesos ocurren naturalmente dependiendo del tipo de suelo, del tipo de cultivo y de las condiciones de manejo. Un conocimiento adecuado de estos procesos en el suelo permite un mejor control de los parámetros que conducen a condiciones ácidas.

### Remoción de Nutrientes

Un suelo con pH neutro tiene saturada la fase de intercambio con cationes básicos (K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>). Estos cationes satisfacen la carga eléctrica de la superficie de los coloides del suelo. La acidificación se inicia con la pérdida de estos cationes debido en parte a la acción de las raíces. La planta, al absorber cationes, libera H<sup>+</sup> para mantener el equilibrio en su interior, lo que contribuye a la reducción del pH del suelo.

Por otro lado, el movimiento de cationes a capas inferiores (lixiviación) contribuye también a la acidificación del suelo. Este movimiento de cationes se debe a la presencia de aniones que formando pares iónicos se encargan de arrastrar los cationes del perfil del suelo con el movimiento del agua. En el inicio, el aporte de aniones a la solución del suelo se produce por medio de la mineralización de la materia orgánica que produce aniones como nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) y cloruro (Cl<sup>-</sup>) que son los que arrastran los cationes básicos del perfil al formar los respectivos pares iónicos. Además, la materia orgánica del suelo se descompone con la ayuda de microorganismos produciendo un constante suplemento de CO<sub>2</sub> que fácilmente se transforma en bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) de acuerdo a la siguiente reacción:



Esta reacción aporta H<sup>+</sup>, que reduce el pH, y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) que se combina fácilmente con los cationes básicos lavándolos del perfil, promoviendo de esta forma condiciones favorables para acidez. La materia orgánica del suelo contiene también grupos carboxílicos y fenólicos activos que se disocian liberando iones H<sup>+</sup> 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.

### Utilización de Fertilizantes Nitrogenados

Los fertilizantes nitrogenados que contienen o forman amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) incrementan la acidez del suelo a menos que la planta absorba NH<sub>4</sub><sup>+</sup> directamente. Ejemplos de estos fertilizantes son el sulfato de amonio [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>], nitrato de amonio (NO<sub>3</sub>NH<sub>4</sub>) y la urea [CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>].

El (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el NO<sub>3</sub>NH<sub>4</sub> aplicados al suelo se disocian liberando amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Esta forma de nitrógeno (N) se convierte en nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) a través de oxidación biológica. El proceso que hace posible esta transformación se denomina nitrificación y se representa con las siguientes reacciones:



Nitrosomonas



Nitrobacter

Como se observa la nitrificación produce un exceso de H<sup>+</sup> que acidifica el suelo. Este es un proceso natural necesario para transformar el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, debido a que las plantas utilizan principalmente NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en su nutrición. Por otra parte, estas reacciones requieren oxígeno (O<sub>2</sub>) por lo tanto es necesario que el suelo se encuentre bien aireado 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 la hidrólisis del material. La primera reacción forma carbamato de amonio que es un compuesto inestable. Esta

reacción eleva el pH en la inmediata vecindad del gránulo de urea a valores mayores que 8.0. En este ambiente alcalino el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y  $\text{CO}_2$ . Estas reacciones se describen a continuación:



El  $\text{NH}_3$  formado al final de estas reacciones es un gas que se volatiliza fácilmente de la superficie del suelo, pudiéndose perder de esta forma apreciable cantidad de N del sistema. El  $\text{NH}_3$  en contacto con agua se transforma en  $\text{NH}_4^+$ , permaneciendo en esta forma estable en el suelo. Por esta razón, es aconsejable incorporar la urea en el suelo para evitar volatilización.

El  $\text{NH}_4^+$  formado después de la hidrólisis de la urea pasa por los mismos procesos de oxidación biológica o nitrificación al igual que el  $\text{NH}_4^+$  de otras fuentes nitrogenadas. Como ya se discutió anteriormente, este proceso lleva inevitablemente a la acidificación del suelo. Es importante indicar que la mineralización de la materia orgánica también produce  $\text{NH}_4^+$  como producto final del proceso de descomposición. Este  $\text{NH}_4^+$  contribuye de igual forma a la acidificación del suelo después de que forzosamente pasa por el proceso de nitrificación descrito anteriormente.

### Aluminio Intercambiable

Es reconocido ampliamente que uno de los principales factores en el desarrollo de la acidez del suelo es la presencia de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) en la solución del suelo. Los iones  $\text{Al}^{3+}$  desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes se hidrolizan (reaccionan con una molécula de agua) para formar complejos monoméricos y poliméricos hidroxi-alumínicos. Las reacciones de hidrólisis del  $\text{Al}^{3+}$  son similares a la reacción de un ácido fuerte como el ácido acético que libera iones  $\text{H}^+$ . La hidrólisis de las formas monoméricas del Al se ilustran en las siguientes reacciones:



Cada una de estas reacciones libera  $\text{H}^+$  y contribuye a la acidez del suelo. Este incremento en acidez promueve la presencia de más  $\text{Al}^{3+}$  listo para reaccionar nuevamente. La Figura 1 describe el comportamiento de las diferentes formas monoméricas del Al con respecto al pH de una solución. Se observa que el  $\text{Al}^{3+}$  aparece en la solución a pH 5.3 y que arriba de este pH se inicia la formación de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  que se precipita, eliminando el Al de la solución. Estas reacciones son importantes en el control de acidez como se discute más adelante.

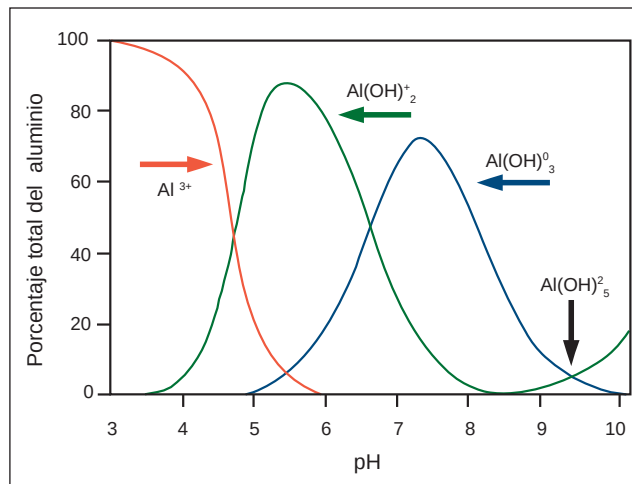


Figura 1. Distribución porcentual de las formas de Al en una solución de acuerdo al pH.

### CLASIFICACION DE LA ACIDEZ

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

**Acidez activa:** Hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) disociado en la solución del suelo y proveniente de diferentes fuentes.

**Acidez intercambiable:** Hidrógeno y aluminio intercambiables ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ) 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

### INTRODUCCION

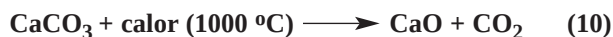
El encalado consiste en la aplicación al suelo de sales básicas que neutralizan la acidez. Los materiales que se utilizan como alcalinizantes o correctivos de acidez son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio (Ca) y/o magnesio (Mg). Debido a su diferente naturaleza química, estos materiales presentan una variable capacidad de neutralización.

### MATERIALES DE ENCALADO

Existen varios materiales que son capaces de reaccionar en el suelo y elevar el pH. Entre los más comunes se pueden citar los siguientes:

#### Oxido de calcio

El óxido de calcio (CaO), también conocido como cal viva o cal quemada, es un polvo blanco muy difícil y desagradable de manejar. Se fabrica calcinado al horno piedra caliza lo que produce la siguiente reacción:



Cuando se aplica en suelo ácido reacciona de inmediato y por esta razón este material es ideal cuando se desean resultados rápidos (iguales resultados se obtienen con el hidróxido de calcio). La velocidad de la reacción se debe a que, por ser un óxido, reacciona rápidamente al ponerse en contacto con el agua provocando una fuerte reacción exotérmica que libera iones OH<sup>-</sup>. Este material debe mezclarse inmediatamente debido a que se endurece rápidamente al ponerse en contacto con la humedad del suelo, haciéndose inefectivo. El óxido de calcio puro contiene 71% de Ca.

#### Hidróxido de calcio

El hidróxido de calcio [Ca(OH)<sub>2</sub>] se conoce también como cal apagada o cal hidratada y se obtiene a partir de la reacción del óxido de calcio con agua de acuerdo con la siguiente reacción:



Es una sustancia blanca, polvorosa difícil y desagradable de manejar. Este material también reacciona en el suelo rápidamente y se debe también incorporar inmediatamente. Este material tiene un

efecto intermedio entre óxido de calcio y el carbonato de calcio para neutralizar la acidez del suelo. En forma pura presenta 56% de Ca.

#### Cal agrícola o calcita

Este es el material más utilizado para encalar los suelos y contiene principalmente carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>). Se obtiene a partir de roca caliza y roca calcárea o calcita que se muele y luego se cierra en mallas de diferente tamaño. Las rocas calizas no son puras y pueden contener impurezas arcillas, hierro, arena y granos de limo que reducen el contenido de carbonato. En su forma pura contiene 40% de Ca.

#### Dolomita

El carbonato doble de calcio y magnesio (CaCO<sub>3</sub>•MgCO<sub>3</sub>) se denomina dolomita. El material puro contiene 21.6% de Ca y 13.1% de Mg. Aunque la dolomita reacciona más lentamente en el suelo que la calcita, tiene la ventaja de que suministra Mg, elemento con frecuencia deficiente en suelos ácidos. Existen otros materiales de contenidos menores de Mg que se usan frecuentemente para encalar el suelo. De acuerdo con su contenido de Mg, los materiales de encalado se clasifican en las categorías señaladas en la Tabla 2. Al igual que otros materiales de encalado, la calidad de la dolomita depende del contenido de impurezas como arcillas y material orgánico.

**Tabla 2. Clasificación de las cales que contienen Mg.**

| Tipo de cal | Mg            | MgO    | MgCO <sub>3</sub> |
|-------------|---------------|--------|-------------------|
|             | ----- % ----- |        |                   |
| Calcítica   | < 3           | < 5    | < 10              |
| Magnesiana  | 3 – 7         | 5 – 12 | 10 – 25           |
| Dolomítica  | > 7           | > 12   | > 25              |

#### Oxido de magnesio

El óxido de magnesio (MgO) es un material de encalado que contiene solamente Mg en una concentración de 60%. Su capacidad de neutralizar la acidez es mucho más elevada que la de otros materiales, pero, por su poca solubilidad en agua, debe ser molido finamente para que controle adecuadamente la acidez del suelo. Es una fuente excelente de Mg en suelos ácidos que frecuentemente tienen también deficiencia de este nutriente.

## Magnesita

Es un producto a base de carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ), que en su forma pura posee un contenido de Mg de 28.5%. Es una excelente fuente de Mg.

## Arcillas calcáreas

Son depósitos no consolidados de  $\text{CaCO}_3$ , conocidos también como margas, de textura arcillosa y con gran cantidad de impurezas. Por lo general, este material se maneja en húmedo lo que disminuye su eficiencia.

## Escorias industriales

Son residuos de la industria del acero (escorias básicas) y la fundición del hierro (escorias Thomas). Los dos contienen silicatos de calcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) y silicatos de magnesio ( $\text{MgSiO}_3$ ) y neutralizan la acidez del suelo a través de la hidrólisis del ión silicato ( $\text{SiO}_3^-$ ). Su capacidad para neutralizar la acidez del suelo es similar al  $\text{CaCO}_3$ .

El uso de estos materiales está limitado a zonas que se encuentran en las cercanías de las industrias de acero y hierro.

## CALIDAD DE LOS MATERIALES DE ENCALADO

Uno de los aspectos más importantes al considerar la eficiencia agronómica es la calidad de los materiales de encalado. La calidad se fundamenta en los siguientes factores: pureza del material, forma química, tamaño de las partículas y poder relativo de neutralización total.

## Pureza química

La pureza es una característica importante de los materiales de encalado que reconoce su composición química y los contaminantes presentes (arcilla, materia orgánica y otros minerales). La capacidad de neutralizar la acidez del suelo depende de la composición química y de la pureza del material. Para determinar la pureza se utiliza el criterio del equivalente químico (EQ) que es una medida del poder de neutralización de una cal en particular. El EQ se define como la capacidad del material para neutralizar la acidez comparado con el poder de neutralización del  $\text{CaCO}_3$  químicamente puro, al cual se le asigna un valor de 100%.

Para determinar el poder de neutralización se debe pesar una cantidad del material y disolverla en una cantidad conocida de ácido, luego el exceso de ácido es titulado con una base. En la Tabla 3 se presentan los valores de poder de neutralización de varios materiales de encalado en su forma pura.

De acuerdo con la Tabla 3, los óxidos e hidróxidos tienen mayor capacidad para neutralizar la acidez que el carbonato de calcio. El óxido de magnesio constituye la forma química más eficiente para neutralizar la acidez del suelo, siendo aproximadamente 2.5 veces más efectivo que el carbonato de calcio. Los materiales de encalado que contienen Mg son más efectivos que aquellos que contienen Ca debido a que el Mg tiene menor peso molecular que el Ca. Los materiales con menos de 80% de EQ (32% de Ca) son de baja calidad, de acuerdo con los criterios utilizados en diferentes países. La legislación Norteamericana, por ejemplo, establece los siguientes contenidos mínimos: Óxido de calcio, EQ=140 (56% Ca); hidróxido de cal-

**Tabla 3. Equivalentes químicos y composición química de materiales de encalado puros.**

| Material              | Equivalente Químico (EQ) | Fórmula                             | Contenido de Ca (%) | Contenido de Mg (%) |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Carbonato de Calcio   | 100                      | $\text{CaCO}_3$                     | 40                  |                     |
| Dolomita              | 108                      | $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ | 21.6                | 13.1                |
| Oxido de calcio       | 179                      | $\text{CaO}$                        | 71                  |                     |
| Hidróxido de calcio   | 138                      | $\text{Ca(OH)}_2$                   | 54                  |                     |
| Hidróxido de magnesio | 172                      |                                     |                     | 41                  |
| Carbonato de magnesio | 119                      |                                     |                     | 28.5                |
| Oxido de magnesio     | 248                      | $\text{MgO}$                        |                     | 60                  |
| Silicato de calcio    | 86                       | $\text{CaSiO}_3$                    | 34.4                |                     |
| Silicato de magnesio  | 100                      | $\text{MgSiO}_3$                    |                     | 24                  |

cio,  $EQ=110$  (44% Ca). La legislación brasileña acepta un valor mínimo de 67% de EQ para cales molidas (Nicholaides, 1983; Alcarde, 1992).

El EQ de un material de encalado se puede calcular utilizando las siguientes fórmulas:

$$EQ \text{ CaCO}_3 = \text{CaO}(\%) \times 1.79 + \text{MgO}(\%) \times 2.48 \quad (12)$$

$$EQ \text{ CaCO}_3 = \text{CaCO}_3(\%) \times 1 + \text{MgCO}_3(\%) \times 1.19 \quad (13)$$

Algunos factores de conversión para materiales de encalado importantes de tener a mano son los siguientes:

- $\text{Ca} \times 1.4 = \text{CaO}$
- $\text{Ca} \times 1.85 = \text{Ca}(\text{OH})_2$
- $\text{Ca} \times 2.5 = \text{CaCO}_3$
- $\text{Mg} \times 1.67 = \text{MgO}$
- $\text{Mg} \times 2.42 = \text{Mg}(\text{OH})_2$
- $\text{Mg} \times 3.5 = \text{MgCO}_3$

## Tamaño de partícula

La fineza de las partículas individuales de la cal determina su velocidad de reacción. A medida que se reduce el tamaño de la partícula de cualquier material de encalado se aumenta el área o superficie de contacto. Un  $\text{m}^3$  de cal sólida sólo tiene  $6 \text{ m}^2$  de superficie. Esa misma cantidad molida y cernida en un tamiz de malla 100, tiene  $60000 \text{ m}^2$  de área superficial. Entre más superficie específica tenga el material, más rápido reacciona la cal en el suelo.

Para estimar la fineza o eficiencia granulométrica (EG) de un material de encalado, se pesa una cantidad determinada del material y se cierra en una secuencia de mallas o cribas de diferente tamaño. Es normal utilizar la siguiente secuencia de mallas: 8 ó 10, 20, 40,

**Tabla 4. Eficiencia relativa granulométrica de la cal con base en el tipo de malla.**

| Número de malla mesh* | Tamaño de los orificios mm | Eficiencia relativa % |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| < 8                   | > 2.36                     | 0                     |
| 8 – 20                | 2.36 - 0.85                | 20                    |
| 20 – 40               | 0.85 - 0.42                | 40                    |
| 20 – 60               | 0.85 - 0.25                | 60                    |
| > 60                  | < 0.25                     | 100                   |

\* Número de orificios por pulgada cuadrada

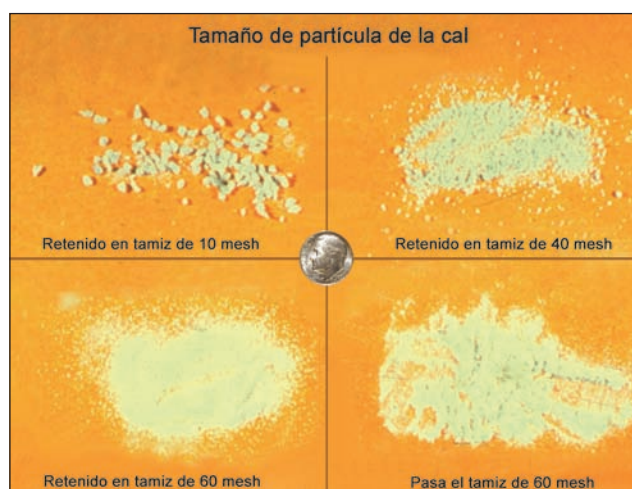
60 y 80 mesh. Esto permite retener en cada tamiz una cantidad de material, separando de esta forma los diferentes tamaños de partículas presentes. Cada tamaño en particular tiene una específica eficiencia granulométrica como se indica en la Tabla 4.

Los materiales que son retenidos en malla de 8 no son efectivos. Los que pasan la malla 8 pero se retienen en malla 20 son 20% efectivos ya que reaccionan muy lentamente. Los que pasan la malla 20 pero se retienen en la 60 son 60% efectivos y pueden reaccionar en un período de 10-18 meses. Por último, todos los materiales que pasan completamente malla 60 tienen 100% de efectividad y reaccionan entre 3 y 6 meses. La cal que pasa por una malla 80 es demasiado fina, pero puede reaccionar en 1-3 meses. La condición ideal es que el 100% del material pase por una malla 8 y 70-80% pase por una malla 60 como se ilustra en la Foto 3.

Los requisitos mínimos de calidad de las cales en Brasil son los siguientes: 95% de la cal debe pasar por una malla 10, 70% del material debe pasar por malla 20, y al menos el 50% del material debe pasar por malla 60 (Alcarde, 1992).

## Poder relativo de neutralización total

Para valorar en forma conjunta la pureza química y la fineza de los materiales de encalado se utiliza un parámetro denominado Índice de Eficiencia conocido también como Poder Relativo de Neutralización Total (PRNT). Este parámetro se obtiene multiplicando la eficiencia granulométrica por el equivalente químico y este producto se divide entre 100.



**Foto 3. Tamaño de las partículas de cal al pasar por diferentes tamices.**

El PRNT indica que porcentaje de la cal, expresada por su equivalente químico (EQ), es capaz de reaccionar en un lapso de 3 meses. Este es el real poder de neutralización de la cal. Por ejemplo, un material con un EQ de 90% y una Eficiencia Granulométrica (EG) de 80%, tendrá un PRNT de 72%  $[(90 \times 80)/100=72]$ . Esto quiere decir que el 72% del material reaccionará en un plazo de 3 meses y lo restante 18%  $(90-72=18)$ , reaccionará posteriormente. Mientras mayor es el valor del PRNT, más reactivo es el material de encalado. Por ejemplo, se recomienda que para café la cal empleada tenga un PRNT mínimo de 75% (Malavolta, 1993).

Las características de calidad de los materiales de encalado son muy variables en todos los países de América Latina. En la Tabla 5 se presentan como ejemplo la gama de calidad de cal comercializada en Costa Rica (Carballo y Molina, 1993). Las cales presentan variaciones importantes en el tamaño de partículas, algunas de ellas con valores inferiores a 60% de eficiencia granulométrica, debido a un deficiente proceso de molienda y la falta de control de calidad. Esto ocurre en casi todos los países donde todavía es posible encontrar canteras cuyo funcionamiento es muy artesanal. Las características de la cal se pueden mejorar modificando los procesos de molienda. Finalmente, con los parámetros evaluados se presenta también el valor calculado de PRNT. En la Foto 4 se presenta una mina típica de carbonato de calcio en Costa Rica y en la Foto 5 se presentan una operación mediana de molienda y ensacado de cal en Ecuador.



Foto 4. Mina de carbonato de calcio a cielo abierto en Costa Rica.

Conociendo el PRNT es posible ajustar la dosis de cal a emplear de acuerdo con su grado de calidad. Un material con 50% de PRNT será la mitad de efectivo que otro con 100% de PRNT. De igual manera, se puede seleccionar la cal de acuerdo con su costo por unidad de PRNT utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Costo por unidad de PRNT} = \frac{\text{Costo por saco o tonelada de material}}{\text{PRNT del material}} \quad (14)$$

En el ejemplo presentado en la Tabla 6 se demuestra la conveniencia de considerar el costo por unidad de PRNT al decidir la compra de un material de encalado. El cálculo revela que la cal de mayor precio por tonelada, tiene el costo menor por unidad de PRNT debido a sus mejores características de calidad.

## REACCIONES DE LA CAL EN EL SUELO

Los mecanismos de reacción de los materiales de encalado permiten la neutralización de los iones  $H^+$  en la solución del suelo por medio de los iones  $OH^-$  producidos al entrar la cal en contacto con el agua del suelo. Es por esta razón que la cal es efectiva solamente cuando existe humedad en el suelo. Los óxidos reaccionan inmediatamente con el agua del suelo transformándose en hidróxidos y neutralizan la acidez a través de su  $OH^-$  que es una base fuerte, por lo que son más efectivos a corto plazo. Los materiales a base de carbonatos y silicatos neutralizan la acidez a través de la hidrólisis (reacción con el agua) de los iones  $CO_3^{2-}$  y  $SiO_3^{2-}$ , que son bases débiles. Como se



Foto 5. Operación de molienda y ensacado de cal en Ecuador.

**Tabla 5. Composición química y calidad, expresada en eficiencia granulométrica (EG), equivalente químico (EQ) y poder relativo de neutralización total (PRNT), de algunos materiales de encalado disponibles en Costa Rica (Carballo y Molina, 1993).**

| Procedencia   | Material  | CaCO <sub>3</sub> | MgCO <sub>3</sub> | Ca   | Mg   | EG   | EQ    | PRNT  |
|---------------|-----------|-------------------|-------------------|------|------|------|-------|-------|
| ----- % ----- |           |                   |                   |      |      |      |       |       |
| Turrialba     | Calcita   | 99.2              | 0.8               | 39.7 | 0.2  | 99.9 | 100.0 | 99.9  |
| Nicoya        | Calcita   | 95.5              | 0.8               | 38.2 | 0.2  | 99.9 | 96.2  | 96.1  |
| Patarrá       | Calcita   | 82.0              | 0.8               | 32.8 | 0.2  | 98.3 | 82.8  | 81.4  |
| Esparza       | Calcita   | 97.3              | 1.3               | 38.9 | 0.3  | 60.0 | 98.3  | 59.0  |
| Coto Brus     | Calcita   | 88.3              | 0.8               | 35.3 | 0.2  | 62.7 | 89.1  | 55.9  |
| Honduras      | Dolomita  | 62.8              | 42.5              | 25.1 | 10.2 | 96.6 | 105.3 | 101.7 |
| Belize        | Dolomita  | 54.5              | 44.4              | 21.8 | 12.8 | 93.0 | 107.3 | 99.8  |
| Guatemala     | Dolomita  | 55.7              | 48.3              | 22.3 | 11.6 | 82.6 | 103.7 | 85.7  |
| Patarrá       | Cal+Magox | 75.5              | 31.2              | 30.2 | 7.5  | 92.6 | 106.7 | 98.8  |

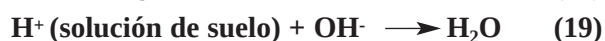
**Tabla 6. Comparación del costo por unidad de PRNT en varios materiales de encalado**

| Material | EG % | EQ % | PRNT % | Costo/t \$ | Costo/PRNT* \$ |
|----------|------|------|--------|------------|----------------|
| A        | 62.2 | 82.7 | 51.4   | 20.0       | 0.39           |
| B        | 56.5 | 91.6 | 51.8   | 17.6       | 0.34           |
| C        | 85.1 | 98.0 | 83.4   | 23.2       | 0.28           |

\* Costo por unidad de PRNT por tonelada

ha indicado anteriormente, los óxidos e hidróxidos, aún cuando más efectivos, son difíciles de manejar y por esta razón los carbonatos son los materiales de encalado de mayor uso en agricultura.

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<sub>3</sub> está directamente relacionada con la tasa a la cual los iones OH<sup>-</sup> son removidos de la solución del suelo a través de la neutralización del H<sup>+</sup> y la formación de H<sub>2</sub>O. Mientras exista H<sup>+</sup> en la solución del suelo el Ca<sup>2+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> continuarán apareciendo en la solución. En esta forma el pH aumenta debido a que disminuye la concentración de H<sup>+</sup> en el suelo.

Es interesante el indicar que el ion calcio (Ca<sup>2+</sup>) proveniente de la disolución del CaCO<sub>3</sub> 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 el ion carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) es el que realmente eleva el pH al hidrolizarse y producir iones OH<sup>-</sup>. Además es importante indicar que el ion CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> se disipa como CO<sub>2</sub> después de las reacciones de hidrólisis. Esta es la razón por la cual el efecto de la cal se limita al lugar de aplicación. En otras palabras, la aplicación superficial de cal no afecta el pH de capas inferiores debido a que la cal no migra a través del perfil sino más bien se disipa como CO<sub>2</sub> en el sitio de aplicación. Este es un aspecto importante en el manejo del encalado.

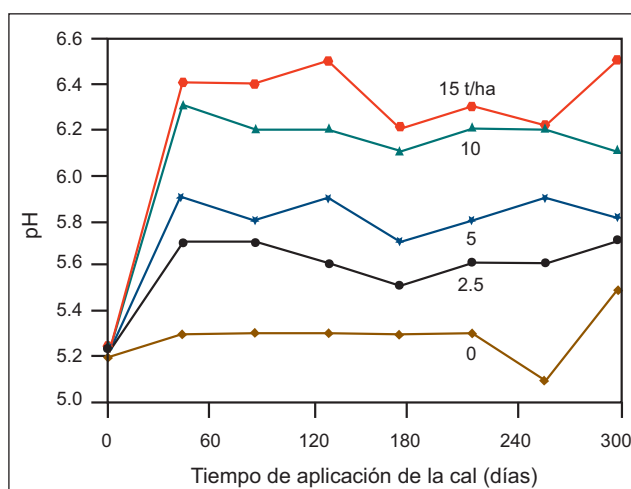
El efecto final de las reacciones de la cal reduce la acidez del suelo (incrementa el pH) al convertir el exceso de H<sup>+</sup> en H<sub>2</sub>O. Sin embargo, es muy importante observar que el efecto del encalado va más allá de estas reacciones. El incremento de pH permite la precipitación del Al<sup>3+</sup> como Al(OH)<sub>3</sub>, que es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico

del  $\text{Al}^{3+}$  en las plantas y la principal fuente de iones  $\text{H}^+$ . De igual manera, las aplicaciones de cal también precipitan el manganeso (Mn) y el hierro (Fe) que en ocasiones se encuentran en exceso en suelos ácidos.

## EPOCA Y METODO DE APLICACION DE LA CAL

Como se indicó anteriormente, la cal se mueve muy poco en el suelo debido a que el ion  $\text{CO}_3^{2-}$  se disipa como  $\text{CO}_2$  después de las reacciones de hidrólisis. Por esta razón, los efectos benéficos de la cal ocurren solamente en la zona de aplicación. Para que la cal sea efectiva es necesario mezclar completamente el material en los primeros 15-20 cm de suelo, utilizando el arado, rastra o cualquier otro implemento. De esta forma se logra mezclar el material con la capa del suelo donde se concentran las raíces activas de la mayoría de los cultivos. Se ha demostrado que las aplicaciones de cal incorporadas son más eficientes, especialmente si el suelo es de textura media a pesada. Los datos del efecto de los métodos de aplicación de cal en el rendimiento de maíz en Oxisoles de Colombia presentados en la Tabla 7 demuestran este hecho.

Sin embargo, no siempre es posible incorporar la cal debido a la operación o a que el cultivo está ya establecido en el campo. En pastos y cultivos perennes, la incorporación completa solamente se puede hacer al inicio del cultivo. Una vez que el cultivo está establecido solamente es posible aplicar cal a la superficie, en ciertos casos con limitada incorporación. En el caso del cafeto, banano y palma aceitera por ejemplo, la aplicación superficial de cal debe hacerse solamente en la banda o zona de fertilización. Esto se debe a que la acidificación ocurre en la banda o corona de fertilización y la aplicación de la cal en esta zona evita el desperdicio de cal en las zonas donde no existe problema. En estos casos, la aplicación superficial de cal eleva el pH en una profundidad restringida en el perfil del suelo (5-10 cm) que en



**Figura 2. Velocidad de reacción de la cal a diferentes dosis de aplicación en un Andisol de Ecuador.**

ocasiones coincide con la zona donde se encuentra la mayor actividad radicular. Si existen problemas de acidez a mayor profundidad, éstos no se pueden resolver con aplicación de cal y se debe recurrir a otros métodos de control de acidez que se discuten más adelante.

Es necesario tener cuidado con la aplicación de cal en cultivos perennes establecidos. Un error común con respecto a la cantidad de cal a aplicarse se comete al dividir la recomendación total por hectárea entre el número de plantas en esa superficie. Al hacer ésto se corre el riesgo de aplicar cantidades excesivas de cal en la zona o banda de fertilización, que es el área que debe recibir la enmienda. Una mejor manera de determinar la cantidad de cal a aplicar por planta es dividiendo la recomendación total por hectárea entre el área de la banda o zona donde se hará la aplicación de la cal. Esto permite aplicar la cal suficiente para controlar la acidez en el área afectada evitando aplicaciones excesivas. En cultivos perennes es mejor eliminar los problemas de acidez aplicado e incorporando, antes de iniciar una nueva plantación, la cantidad de cal necesaria. Sin embargo, se pueden desarrollar problemas de acidez más adelante en la vida de la plantación que deben ser solucionados como se indicó anteriormente.

Las reacciones de neutralización de la cal ocurren en presencia de agua, por lo que se debe aplicar la cal en un suelo húmedo. Si no existe humedad en el suelo las reacciones de neutralización no se producen. En condiciones apropiadas, las reac-

**Tabla 7. Efecto del método de aplicación de dolomita en el rendimiento de maíz en Oxisoles de Colombia (Adaptado de León, 1998).**

| Método de aplicación  | Rendimiento (kg/ha) |         |             |
|-----------------------|---------------------|---------|-------------|
|                       | Sikuani*            | Tuxpeño | CIM. 33 SA8 |
| Voleo e incorporado** | 4190                | 3447    | 3200        |
| Banda                 | 1653                | 1418    | 603         |

\* Materiales de CIMMYT  
 \*\* Dosis de dolomita = 3.5 t/ha

ciones ocurren relativamente rápido como se observa en los datos de la Figura 2. Por esta razón, la época más apropiada para aplicar la cal es un poco antes o al inicio de las lluvias. En algunos países de Centroamérica, en el cultivo del café, es usual que la cal se agregue en los últimos meses de la estación seca para que el efecto del encalado se vea en las primeras brotaciones. Sin embargo, no existen limitaciones en cuanto a la época de aplicación siempre que haya humedad en el suelo y que no coincida con un ciclo de fertilización al suelo. En siembras nuevas, la cal debe ser siempre incorporada antes de sembrar.

Una vez aplicada la cal, se debe esperar un tiempo prudencial (1-2 meses) para que reaccione antes de añadir el fertilizante. El contacto directo de la cal con fertilizantes nitrogenados amoniacales en la superficie del suelo favorece la formación de carbonato de amonio, el cual a su vez se transforma en amoníaco que se pierde por volatilización. También el contacto con fertilizantes fosfatados causa pérdidas de fósforo debido a la formación de fosfatos de calcio insolubles.

Como la cal no se mueve en el suelo, la distribución del material en el campo al momento de aplicación es otro aspecto muy importante que debe tomarse en cuenta. Si la cal va a ser incorporada con arado, ésta debe distribuirse en forma uniforme en todo el terreno. Si la aplicación no es uniforme solamente se controla la acidez en los lugares donde cae la cal y el cultivo al crecer presenta también un aspecto poco uniforme, con plantas grandes y pequeñas distribuidas en el lote. Las Fotos 6, 7, 8 y 9 ilustran la aplicación uniforme de cal en lotes grandes y pequeños. En las

Fotos 10, 11, 12 y 13 se ilustra la operación de mezcla completa de cal en el suelo. En la Foto 14 se observa el efecto en el cultivo de una aplicación poco uniforme de cal y en la Foto 15 el de una aplicación uniforme.

En cultivos perennes con distancias de siembra amplias, la cal debe distribuirse en el área de gotera o rodaja, que es donde se concentran las raíces (Foto 16, 17 y 18). En cultivos perennes también resulta muy práctico incorporar cal en el hoyo de siembra antes de poner la planta.

### EFECTO RESIDUAL DE LA CAL

El efecto residual de la cal depende de la velocidad de reacción de la cal en el suelo. Entre los factores que intervienen en este proceso se pueden citar los siguientes:

#### Condiciones de suelo y clima

La condición de acidez del suelo es el principal factor que hace que la cal reaccione en el suelo. Mientras existan iones  $H^+$  en la solución del suelo, las reacciones del ion  $CO_3^{2-}$  continúan hasta neutralizar el  $H^+$  o precipitar el  $Al^{+3}$ . La aplicación de cal en suelos neutros es inocua precisamente porque no existe  $H^+$  que es la fuerza que motiva las reacciones de la cal. En ocasiones se aplica cal a suelos de pH alto que tienen contenidos bajos de Ca buscando utilizar el material como fuente de este nutriente. En este caso, la cal permanecerá sin ningún cambio en el suelo por tiempo indefinido. En suelos de pH alto que necesitan Ca se



Foto 6. Aplicación uniforme de cal utilizando maquinaria.



Foto 7. Aplicación uniforme de cal utilizando maquinaria.



**Foto 8. Aplicación manual y uniforme de cal en un lote grande.**



**Foto 9. Aplicación manual y uniforme de cal en un lote pequeño.**



**Foto 10. Incorporación completa de cal con maquinaria.**



**Foto 11. Incorporación completa de cal con maquinaria.**



**Foto 12. Incorporación completa de cal usando rotavator.**



**Foto 13. Incorporación completa de cal usando bueyes.**



**Foto 14. Efecto de la aplicación poco uniforme de cal en el cultivo de soya.**



**Foto 15. Cultivo uniforme de maíz como efecto de una aplicación efectiva de cal.**



**Foto 16. Aplicación de cal alrededor del tronco en palma aceitera.**



**Foto 17. Aplicación de cal alrededor del tronco de naranjo.**



**Foto 18. Aplicación de cal alrededor de plantas de café.**

debe utilizar yeso para suplir este nutriente. Esto generalmente ocurre en suelos arenosos.

En suelos con pendientes muy fuertes, la cal aplicada superficialmente puede perderse por escorrentía y erosión. Se ha demostrado que la lixiviación de Ca y/o Mg proveniente de la cal, es elevada en suelos de texturas livianas y alta capacidad de infiltración. Los suelos ácidos de textura arenosa deben ser encalados con mayor frecuencia que los arcillosos.

La alta temperatura y humedad favorecen la reacción de la cal. Por tal motivo, los materiales de encalado son más reactivos en zonas tropicales que en sitios fríos o templados.

## Naturaleza química del material

Los productos que forman bases fuertes como los óxidos e hidróxidos reaccionan rápidamente, pero su efecto residual no es muy prolongado debido a que los OH<sup>-</sup> aportados se consumen inmediatamente. Por otro lado, las bases débiles como los carbonatos, son de reacción más lenta y de mayor efecto residual.

## Tamaño de partícula

Los materiales más finos reaccionan mucho más rápido que los gruesos y su efecto residual es menor. Los materiales muy finos pueden perderse fácilmente por acción del viento durante la aplicación, lo que hace difícil una aplicación uniforme. La cal retenida en mallas 20 y 40 puede reaccionar en un plazo que oscila entre 1 y 3 años, dependiendo de las condiciones climáticas. El material retenido en malla 10 no tiene efecto sobre la acidez del suelo.

## Cultivo

En cultivos de ciclo muy corto, como hortalizas y algunas ornamentales, es preferible el uso de materiales de rápida reacción y alta fineza tales como los óxidos e hidróxidos de calcio. En cultivos perennes se

pueden utilizar cales con un tamaño de partícula un poco más grueso, pero con efecto residual más prolongado.

## Intensidad del cultivo

Los suelos intensamente cultivados y fertilizados con N son susceptibles a acidificarse en el mediano plazo si no se toman medidas oportunas de corrección. Los fertilizantes nitrogenados amoniacales dejan efecto residual ácido como consecuencia de la nitrificación del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> por las bacterias del suelo. Además, los fertilizantes amoniacales presentan un índice de acidez fisiológico alto (Tabla 8). La acidez fisiológica es un término relativo que indica la cantidad de CaCO<sub>3</sub> que podría neutralizar el efecto de la acidez causada por un fertilizante y se expresa en kg de CaCO<sub>3</sub>/100 kg de fertilizante. Entre más alto el valor de la acidez fisiológica, mayor es el efecto residual ácido que podría dejar un fertilizante.

Datos que demuestran el efecto acidificante de los fertilizantes nitrogenados a mediano plazo se presentan en las Tablas 9 y 10. En la Tabla 9 se presentan datos de un Andisol de fertilidad media cultivado con café en Costa Rica. Luego de 8 años de fertilización intensiva, el pH del suelo y el contenido de bases de inter-

**Tabla 8. Acidez residual producida por fertilizantes nitrogenados (Tisdale et al. 1993).**

| Fuente de N         | N %  | Reacción de nitrificación                                                                                                                      | Índice de Acidez* |
|---------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Sulfato de amonio   | 21   | $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 4\text{O}_2 \rightleftharpoons 4\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$            | - 112             |
| Urea                | 46   | $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + 4\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$                    | - 84              |
| Fosfato diamónico   | 18   | $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + 4\text{O}_2 \rightleftharpoons 3\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + 2\text{H}_2\text{O}$    | - 74              |
| Fosfato monoamónico | 12   | $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{PO}_4^- + \text{H}_2\text{O}$ | - 65              |
| Nitrato de amonio   | 33.5 | $\text{NH}_4\text{NO}_3 + 2\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$                                    | - 63              |

\* Índice de acidez fisiológica = (-) kg CaCO<sub>3</sub>/100 kg fertilizante

**Tabla 9. Efecto de 8 años de fertilización intensiva sobre la fertilidad de un Andisol cultivado con café en Heredia, Costa Rica (Ramírez, 1997).**

| Fertilizante            | pH  | Ca  | Mg  | K    | Al   | CICE  | Saturación de Al |
|-------------------------|-----|-----|-----|------|------|-------|------------------|
| kg/ha/año               |     |     |     |      |      |       | %                |
| Testigo                 | 5.5 | 6.9 | 1.8 | 0.67 | 0.72 | 10.09 | 7                |
| 660 Fórmula completa*   | 4.8 | 3.1 | 1.2 | 0.61 | 2.20 | 7.11  | 31               |
| 1320 Fórmula completa   | 4.7 | 3.8 | 1.4 | 0.72 | 1.50 | 7.42  | 20               |
| 750 Nitrato de amonio** | 4.5 | 3.5 | 0.9 | 0.35 | 2.41 | 7.16  | 34               |

\* Fórmula completa 18-5-15-6-2; \*\* Nitrato de Amonio 33.5 – 0 – 0

**Tabla 10. Efecto de la aplicación de diferentes fuentes de N en las propiedades de un suelo volcánico de Colombia (adaptado de Valencia y Carrillo, 1990).**

| Tratamientos*      | pH  | Al                    | K   | Ca  | Mg  | Suma bases |
|--------------------|-----|-----------------------|-----|-----|-----|------------|
|                    |     | ----- cmol(+)/L ----- |     |     |     |            |
| Testigo            | 5.1 | 3.5                   | 0.4 | 3.1 | 0.8 | 4.3        |
| Sulfato de amonio  | 3.6 | 8.6                   | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.7        |
| Fórmula 12-12-17-2 | 4.1 | 3.4                   | 1.8 | 3.5 | 0.9 | 6.1        |
| Nitrato de amonio  | 3.6 | 6.3                   | 0.1 | 0.5 | 0.2 | 0.7        |

\* Equivalente a 168 g de N en macetas de 25 litros de capacidad.

**Tabla 11. Efecto de la fertilización en muestras pareadas de suelos (calle y zona de raíces). Servicio de análisis de suelos de Cenicafé, Colombia (Valencia, 1998).**

| Localización        | pH  | P    | K    | Ca                    | Mg  | Al  |
|---------------------|-----|------|------|-----------------------|-----|-----|
|                     |     | ppm  |      | ----- meq/100 g ----- |     |     |
| Zona sin fertilizar | 5.2 | 2    | 0.33 | 0.8                   | 0.8 | 0.2 |
| Zona fertilizada    | 4.2 | 839  | 1.60 | 1.5                   | 1.5 | 0.9 |
| Zona sin fertilizar | 5.3 | 0    | 0.11 | 2.3                   | 0.4 | 0.3 |
| Zona fertilizada    | 4.3 | 6    | 1.40 | 1.3                   | 0.2 | 1.1 |
| Zona sin fertilizar | 5.4 | 1    | 0.49 | 4.3                   | 1.2 | 0.1 |
| Zona fertilizada    | 4.4 | 152  | 2.20 | 2.6                   | 1.5 | 1.3 |
| Zona sin fertilizar | 5.4 | 2    | 0.21 | 4.7                   | 1.0 | 0.2 |
| Zona fertilizada    | 3.9 | 1170 | 1.60 | 1.0                   | 0.8 | 2.9 |
| Zona sin fertilizar | 5.6 | 5    | 0.54 | 7.6                   | 1.5 | -   |
| Zona fertilizada    | 4.4 | 885  | 1.35 | 1.4                   | 0.9 | 2.4 |
| Zona sin fertilizar | 5.2 | 2    | 0.42 | 2.3                   | 0.4 | 0.4 |
| Zona fertilizada    | 4.4 | 95   | 0.75 | 0.8                   | 0.2 | 1.8 |
| Zona sin fertilizar | 5.4 | 12   | 0.21 | 10.0                  | 3.2 | 0.8 |
| Zona fertilizada    | 4.6 | 98   | 0.68 | 5.8                   | 1.6 | 4.5 |
| Zona sin fertilizar | 5.5 | 13   | 0.28 | 7.8                   | 2.7 | 0.2 |
| Zona fertilizada    | 4.5 | 205  | 0.62 | 1.9                   | 0.7 | 4.7 |

cambio se redujeron, al compararlos con el tratamiento testigo sin fertilización. El contenido de Al intercambiable y el porcentaje de saturación de Al se incrementaron con la fertilización. El efecto sobre la fertilidad del suelo fue más marcado cuando solamente se aplicó N en forma de nitrato de amonio. Datos similares se observan en la Tabla 10 en suelos volcánicos cultivados con café en Colombia (Valencia y Carrillo, 1990).

La Tabla 11 presenta resultados de análisis de suelos del archivo de reportes de muestras analizadas por el servicio de análisis de suelos de Cenicafé, Colombia. En esta tabla aparecen, por pares, muestras de un mismo lote o finca. La primera muestra corresponde

a la zona de raíces (zona fertilizada) y la otra a la calle del cafetal (zona no fertilizada). La muestra de la zona fertilizada es la que presenta el pH mas bajo, mayores contenidos de P, K y Al, y menor contenido de Ca y Mg como efecto directo del  $\text{NH}_4^+$  en estas propiedades del suelo.

Los datos arriba presentados demuestran que la aplicación de fuentes de N que contengan, o reaccionen en el suelo para formar  $\text{NH}_4^+$ , reducen el pH. El sulfato de amonio reduce más el pH por su contenido de  $\text{NH}_4^+$ . Es importante aclarar que el ion sulfato ( $\text{SO}_4$ ) no tiene incidencia en el pH del suelo y el efecto de incremento de acidez con sulfato de amonio se debe principalmente a la nitrificación del amonio presente.

**Tabla 12. Acidificación causada por fertilizantes nitrogenados durante un período de 5 años en un suelo volcánico cultivado con café y el efecto del uso oportuno de cal (Naranjo, Costa Rica).**

| Tratamientos*                                                            | pH  | Ca                    | Mg  | K    | Al  | Saturación de Al (%) |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|-----------------------|-----|------|-----|----------------------|
|                                                                          |     | ----- cmol(+)/L ----- |     |      |     |                      |
| Urea                                                                     | 4.4 | 1.8                   | 0.4 | 0.35 | 3.5 | 58                   |
| Nitrato de amonio                                                        | 4.6 | 1.7                   | 0.4 | 0.28 | 3.0 | 54                   |
| Urea + cal**                                                             | 5.5 | 6.1                   | 0.5 | 0.42 | 1.0 | 12                   |
| * Todos los tratamientos recibieron 300 kg N/ha/año                      |     |                       |     |      |     |                      |
| ** Se aplicaron 2 ton/ha/año de CaCO <sub>3</sub> en el 1°, 3° y 4° años |     |                       |     |      |     |                      |

**Tabla 13. Efecto de la aplicación de cal en el pH del suelo y en el rendimiento, de los primeros cinco años de producción, de palma aceitera en suelos volcánicos de Ecuador (adaptado de Mite et al., 1998).**

| Tratamientos*                                                                                                             | ----- pH ----- |      |      | ----- Rendimiento (t/ha) ----- |      |      |      |      |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------|------|--------------------------------|------|------|------|------|-------|
|                                                                                                                           | 1993           | 1996 | 1997 | 1993                           | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | Total |
| Testigo                                                                                                                   | 6.5            | 5.8  | 6.2  | 8.8                            | 13.5 | 24.7 | 24.8 | 29.3 | 101.1 |
| N                                                                                                                         | 6.4            | 5.1  | 5.7  | 9.0                            | 14.3 | 26.3 | 23.7 | 30.9 | 104.2 |
| NPK                                                                                                                       | 6.5            | 5.4  | 5.6  | 12.0                           | 18.9 | 24.3 | 25.6 | 33.4 | 114.2 |
| NPKSMg                                                                                                                    | 6.4            | 5.5  | 5.6  | 10.9                           | 19.6 | 24.6 | 26.6 | 32.7 | 114.4 |
| NPKSMg+cal                                                                                                                | 6.5            | 5.9  | 6.1  | 11.6                           | 19.1 | 29.3 | 28.3 | 35.4 | 123.7 |
| * N = Urea; P = Superfosfato triple; K = Muriato de potasio; S y Mg = Sulfato de magnesio; Cal = Carbonato de calcio 98%. |                |      |      |                                |      |      |      |      |       |

Por otro lado, la urea acidifica menos el suelo porque la primera reacción de hidrólisis en el suelo es alcalina y atenúa el efecto acidificante del material. Sin embargo, la formación de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> después de la primera reacción de hidrólisis aporta a la acidez del suelo como se describe anteriormente en este capítulo.

La acción residual ácida de los fertilizantes nitrogenados amoniacales puede ser prevenida con la aplicación oportuna de cal, como lo muestran los resultados de la Tabla 12, en un suelo ácido cafetalero sometido a fertilización nitrogenada intensiva.

La combinación de urea y cal mantuvo un nivel moderado de acidez en el suelo al cabo de 5 años de utilizar una dosis de 300 kg de N/ha/año. El mismo efecto lograron aplicaciones anuales de cal en el pH del suelo y en el rendimiento de palma aceitera en suelos volcánicos de Ecuador como se observa en la Tabla

13. Sin embargo, es necesario aclarar que no deben hacerse aplicaciones conjuntas de cal y urea para evitar la volatilización del N.

Además del efecto de acidificación causada por la nitrificación del NH<sub>4</sub><sup>+</sup> es importante mencionar el efecto de la acumulación de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el pH del suelo. El NO<sub>3</sub><sup>-</sup> es la forma final de N después de los procesos de mineralización y nitrificación. Esta forma de N no es retenida por la fase de intercambio y es muy móvil. Una alta concentración de iones NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el suelo produce una abundancia de pares iónicos que se combinan con los cationes básicos (K, Ca, Mg) sacándolos de esta forma del perfil del suelo. La lixiviación de cationes básicos favorece la presencia de cationes ácidos (H, Al) en la fase de intercambio. De esta manera, el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> puede indirectamente contribuir a la acidificación del suelo, en ocasiones en forma considerable.

## DETERMINACION DE LOS REQUERIMIENTOS DE CAL

### INTRODUCCION

El pH, determinación rutinaria en el análisis de suelos, es un buen indicador de la acidez, sin embargo, este parámetro no determina el requerimiento o cantidad de cal necesaria para llegar al rango de pH requerido en el sistema de producción que se está utilizando.

La mayor parte de la acidez en los suelos tropicales (excluyendo los suelos orgánicos) proviene del Al, pero generalmente se habla de acidez intercambiable ( $\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$ ) y Al intercambiable ( $\text{Al}^{+3}$ ) como si fueran sinónimos. La acidez intercambiable se determina mediante la extracción del  $\text{Al}^{+3}$  y el  $\text{H}^+$  del suelo con una sal neutra no tamponada, como KCl 1N. El extracto se titula luego con una base. Para determinar el  $\text{Al}^{+3}$  se puede titular nuevamente el extracto final. La acidez intercambiable se expresa en meq/100 mL o  $\text{cmol}(+)/\text{L}$ . Se considera que contenidos de acidez intercambiable en el suelo mayores que 0.5  $\text{cmol}(+)/\text{L}$  podrían ser problemáticos para los cultivos.

La suma de bases ( $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+$ ) es también un parámetro importante a considerar ya que un valor inferior a 5  $\text{cmol}(+)/\text{L}$  puede incidir en el rendimiento de los cultivos y se relaciona con suelos de baja fertilidad. Cuando a la suma de bases ( $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+$ ) se le agrega la acidez intercambiable ( $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ ) se obtiene la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) de un suelo.

Con estos valores es posible estimar otros parámetros de diagnóstico, quizás los más útiles, que son el porcentaje de saturación de acidez y el porcentaje de saturación de Al. Estos parámetros se calculan mediante las siguientes fórmulas que se presentan abajo:

La saturación de acidez y la saturación de Al determinan el porcentaje del complejo de intercambio catiónico que está ocupado por  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$  o por  $\text{Al}^{3+}$ . Estos valores constituyen mejores criterios para diagnosticar problemas de acidez. Cada cultivo, variedad o cultivar

tiene su grado de tolerancia a la acidez o al  $\text{Al}^{3+}$ , que depende de las características genéticas de la planta. En términos prácticos se puede utilizar cualquiera de los dos parámetros para diagnosticar problemas de acidez, dependiendo de los parámetros que se obtienen en el laboratorio. En general, se puede indicar que casi ningún cultivo soporta más de 60% de saturación de acidez intercambiable o de  $\text{Al}^{3+}$ , y el valor deseable para la mayoría de las plantas oscila entre 10 y 25%.

### ESTIMACION DE LAS DOSIS DE CAL PARA NEUTRALIZAR LA ACIDEZ

Existe una gran diversidad de suelos en los trópicos y por esta razón no se pueden hacer recomendaciones generales de manejo, particularmente en control de acidez. 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). Estas importantes diferencias determinan que método debe utilizarse para evaluar los requerimientos de cal. En América Latina se encuentran presentes todas estas clases de suelos.

### 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 (reducción del pH) conduce a la ruptura de la estructura de los cristales de las arcillas y a la liberación de su Al estructural. Este Al ocupa los sitios de intercambio dejados por las bases desplazadas. Estos suelos, por tener arcillas de superficie de baja reactividad,

$$\text{Saturación de Acidez (\%)} = \frac{\text{acidez } [\text{cmol } (+)/\text{L}]}{\text{CICE} = (\text{Al} + \text{H} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) [\text{cmol}(+)/\text{L}]} \times 100 \quad (20)$$

$$\text{Saturación de Al (\%)} = \frac{\text{Al intercambiable } [\text{cmol } (+)/\text{L}]}{\text{CICE} = (\text{Al} + \text{H} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) [\text{cmol}(+)/\text{L}]} \times 100 \quad (21)$$

**Tabla 14. Efecto de la aplicación de dolomita en el pH, contenido de bases, CIC y en el rendimiento de soya y maíz en un Mollisol de Santa Fe, Argentina (Gambaudo y Fontanetto, 1995, 1997).**

| Dolomita<br>kg/ha | pH  | Ca<br>----- | Mg<br>----- | Na<br>meq/100g | K<br>----- | CIC* | Rendimiento (kg/ha) |       |
|-------------------|-----|-------------|-------------|----------------|------------|------|---------------------|-------|
|                   |     |             |             |                |            |      | Soya                | Maíz  |
| 0                 | 5.7 | 7.8         | 1.6         | 0.4            | 0.8        | 14.2 | 2622                | 8397  |
| 2000              | 6.5 | 9.0         | 1.8         | 0.4            | 0.8        | 14.2 | 3368                | 9942  |
| 4000              | 6.8 | 9.7         | 1.9         | 0.4            | 0.7        | 14.4 | 3365                | 10249 |

\* CIC medida con acetato de amonio pH 7.0

fácilmente pueden 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 encalado incrementa poco o nada la CIC del suelo (suelos de carga permanente). Un ejemplo del efecto del encalado en este tipo de suelos se presenta en la Tabla 14.

Un método común para determinar las necesidades de cal en suelos de carga permanente utiliza soluciones tampón. La solución tampón más popular es la SMP buffer (Schoemaker, Mclean y Pratt, 1961) desarrollada para suelos ácidos de Ohio, E.U. Esta solución está compuesta de p-nitrofenol, trietanolamina, cromato de potasio, acetato de calcio y cloruro de calcio todo ajustado a pH 7.5. Los valores de pH de equilibrio de la suspensión suelo - agua - solución tampón en una relación 5:5:10, de varias muestras de suelo, se correlacionan con la cantidad de cal necesaria para elevar el pH a un valor de 6.8 determinada por incubación con  $\text{CaCO}_3$ , de las mismas muestras de suelo. De este modo se obtiene una curva de calibración con cuyos datos se puede construir una tabla de recomendación que determina la cantidad de cal necesaria para lograr determinado pH. Un ejemplo se presenta en la Tabla 15. Se han hecho adaptaciones de este método para otros tipos de suelos como lo ilustran los datos de la Tabla 16 desarrollados para suelos del sur de Brasil.

Estos métodos funcionan satisfactoriamente en suelos de carga permanente y son recomendables para suelos ácidos dominados por arcillas de tipo 2:1. En América Latina existen áreas dominadas por este tipo de suelos en casi todos los países. En suelos ácidos tropicales de carga variable (Oxisoles, Ultisoles y Andisoles) el uso de esta metodología recomienda cantidades muy altas de cal que no son realmente necesarias. A continuación se discuten métodos más convenientes para determinar los requerimientos de cal en suelos de

**Tabla 15. Cantidad de cal a añadirse de acuerdo al cambio de pH de la suspensión suelo-solución buferizada (método SMP) y el pH al cual se requiere llegar en suelos de Ohio, Estados Unidos (Shoemaker et al., 1961).**

| Indice<br>SMP | pH en agua a obtenerse después<br>de la aplicación de la cal |      |      |
|---------------|--------------------------------------------------------------|------|------|
|               | 6.0                                                          | 6.4  | 6.8  |
|               | ----- cal (t/ha)* -----                                      |      |      |
| 4.8           | 22.5                                                         | 26.2 | 30.6 |
| 4.9           | 21.3                                                         | 24.9 | 29.2 |
| 5.0           | 20.6                                                         | 23.7 | 27.7 |
| 5.1           | 19.3                                                         | 22.5 | 26.2 |
| 5.2           | 18.3                                                         | 21.3 | 24.7 |
| 5.3           | 17.0                                                         | 20.3 | 23.2 |
| 5.4           | 16.1                                                         | 19.0 | 22.0 |
| 5.5           | 14.8                                                         | 17.8 | 20.5 |
| 5.6           | 13.8                                                         | 16.6 | 19.0 |
| 5.7           | 12.8                                                         | 15.3 | 17.5 |
| 5.8           | 11.9                                                         | 14.1 | 16.1 |
| 5.9           | 10.9                                                         | 12.8 | 14.8 |
| 6.0           | 9.6                                                          | 11.6 | 13.3 |
| 6.1           | 8.6                                                          | 10.4 | 11.9 |
| 6.2           | 7.7                                                          | 9.1  | 10.4 |
| 6.3           | 6.7                                                          | 7.9  | 9.1  |
| 6.4           | 5.7                                                          | 6.7  | 7.7  |
| 6.5           | 4.5                                                          | 5.4  | 6.2  |
| 6.6           | 3.5                                                          | 4.2  | 4.7  |
| 6.7           | 2.5                                                          | 3.0  | 3.5  |

\* Dosis expresadas como  $\text{CaCO}_3$  puro.

carga variable.

## 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

**Tabla 16. Cantidad de cal a añadirse de acuerdo al cambio de pH de la suspensión suelo-solución buferizada (método SMP) y el pH al cual se requiere llegar en suelos del sur de Brasil (Fernandes de Sequeira, et al., 1987).**

| Indice<br>SMP | pH en agua a obtenerse después<br>de la aplicación de la cal |      |      |
|---------------|--------------------------------------------------------------|------|------|
|               | 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  |
| 6.4           | 0.0                                                          | 0.6  | 1.5  |
| 6.5           | 0.0                                                          | 0.2  | 0.7  |
| 6.6           | 0.0                                                          | 0.0  | 0.0  |

suelos tropicales rojos (Oxisoles y Ultisoles, Fotos 19 y 20) 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. Esto ocurre generalmente a pH 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 e incrementa apreciablemente la CIC (suelos de carga variable) como se presenta en la Tabla 17. Este incremento en pH es suficiente para el adecuado crecimiento y rendimiento de los cultivos (Tabla 18 y Fotos 21 y 22).

Siguiendo este concepto, se puede predecir los requie-

rimientos de cal para la mayoría de los suelos tropicales aplicando la siguiente ecuación (Kamprath, 1990):

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \text{Factor} \times \text{cmol Al/kg de suelo} \quad (22)$$

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 el Al y eliminar su efecto tóxico. 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.

Por otro lado, existen cultivos tolerantes al Al que pueden crecer y producir satisfactoriamente a moderadas tasas de saturación de Al en la fase de intercambio. Sin embargo, la tolerancia a la acidez es muy variable entre cultivos y aun dentro de una misma especie existen diferencias notables entre variedades (Sanchez, 1987; Sanchez y Owen, 1994). El caso del arroz se presenta en la Figura 3. Cultivos desarrollados originalmente en suelos calcáreos como el algodón, sorgo, soya y alfalfa son susceptibles a niveles bajos de saturación de Al, mientras que otros que han crecido en ambientes más silvestres son altamente tolerantes (Foto 23). La Figura 4 ilustra este hecho al comparar el comportamiento de diferentes cultivos en un Oxisol de Colombia. En la Tabla 19 se presentan los valores de tolerancia de saturación de Al de algunos cultivos y el Porcentaje Recomendado de Saturación (PRS) para la producción de los mismos.

En el caso de los cultivos con cierta tolerancia a la acidez no es necesario precipitar todo el Al pudiéndose utilizar cantidades aun menores de cal que solamente reducirán la saturación de Al a los valores requeridos. Para esto se utiliza un método de cálculo que da mucha importancia a la saturación de bases del suelo.



Foto 19. Perfil típico de un Oxisol de muchas áreas tropicales de América Latina.

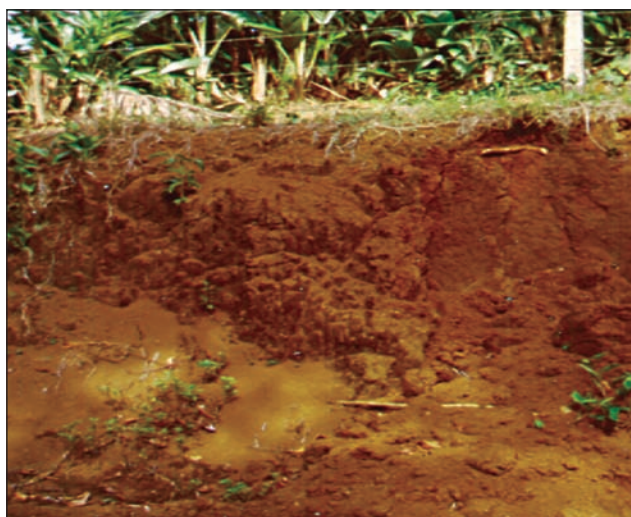


Foto 20. Perfil típico de un Ultisol de muchas áreas tropicales de América Latina.



Foto 21. Respuesta del arroz al encalado en un Ultisol de Panamá.



Foto 22. Respuesta de la soya a la aplicación de cal en un Oxisol de Colombia.

Tabla 17. Efecto del encalado en los parámetros químicos en un Ultisol rojo de Panamá (Name, 1992).

| Tratamiento  | pH  | Ca                               | Mg   | K    | Al   | CIC efectiva | Rendimiento de arroz |
|--------------|-----|----------------------------------|------|------|------|--------------|----------------------|
|              |     | ----- cmol (+)/kg de suelo ----- |      |      |      |              | kg/ha                |
| Sin cal      | 4.9 | 1.79                             | 1.12 | 0.11 | 2.15 | 5.18         | 2571                 |
| Cal (4 t/ha) | 5.8 | 7.90                             | 6.73 | 0.14 | 0.09 | 14.85        | 4280                 |

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. En estos suelos, 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 han surgido varios métodos 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

**Tabla 18. Efecto del encalado en el rendimiento de varios cultivos y en el pH del suelo en Oxisoles de Brasil (Kamprath, 1990).**

| ----- Soya -----          |     |                | ----- Trigo -----         |     |                | ----- Maíz ----- |                |
|---------------------------|-----|----------------|---------------------------|-----|----------------|------------------|----------------|
| CaCO <sub>3</sub><br>t/ha | pH  | Rend.<br>kg/ha | CaCO <sub>3</sub><br>t/ha | pH  | Rend.<br>kg/ha | pH               | Rend.<br>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           |



**Foto 23. Tolerancia al Al de varios genotipos de Millo en un experimento de campo conducido en un Oxisol de Colombia.**

del cafeto, la experiencia Brasileña demuestra que se debe llevar al suelo a una saturación de bases de 60% para rendimiento óptimo. En otras palabras, el cafeto puede crecer satisfactoriamente hasta con una saturación de 40% de Al en la fase de intercambio. En realidad, lo que se busca es reducir el porcentaje de saturación de Al a un nivel que puede ser tolerado por el cultivo antes que encalar para neutralizar todo el Al intercambiable. A continuación se presentan variaciones del cálculo de los requerimientos de cal que son usados indistintamente en diferentes regiones de América Latina.

### **Método de Cochrane, Salinas y Sánchez (1980)**

Esta fórmula es la más sencilla, pues toma en cuenta la neutralización de parte del porcentaje de saturación de acidez en relación con la CICE del suelo, que a su vez se multiplica por una constante, con la que se cubren los factores que limitan la eficiencia de la reacción química de la cal en el suelo, a saber, calidad del

material encalante, reacciones paralelas en el suelo y el Al no intercambiable proveniente de la materia orgánica. La fórmula final se presenta a continuación:

$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{1.8 \text{ (Al - PRS) (C I C E)}}{100} \quad (23)$$

**de donde:**

Al = Al intercambiable existente en el suelo  
 PRS = Porcentaje de saturación de acidez deseado (Tabla 19)  
 CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva

### **Método de Van Raij (1991)**

El principio de esta fórmula es exactamente el mismo que el anterior sólo que expresado en términos de saturación de bases en lugar de acidez, con la ventaja que incluye el factor f, que se refiere a la calidad del material encalante.

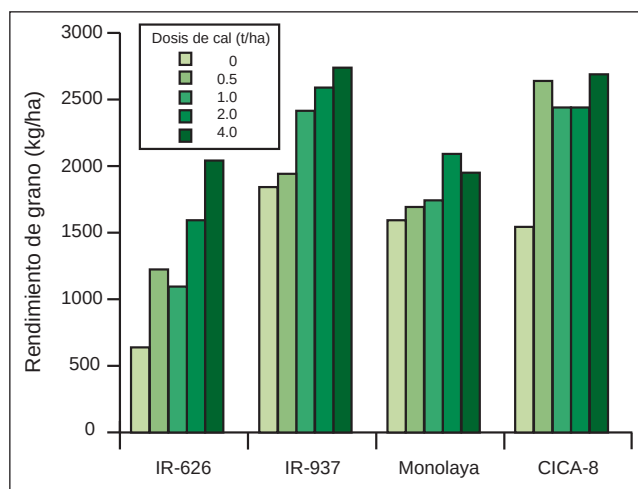
$$\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{(V1 - V2) (C I C E)}{100} \times f \quad (24)$$

**de donde:**

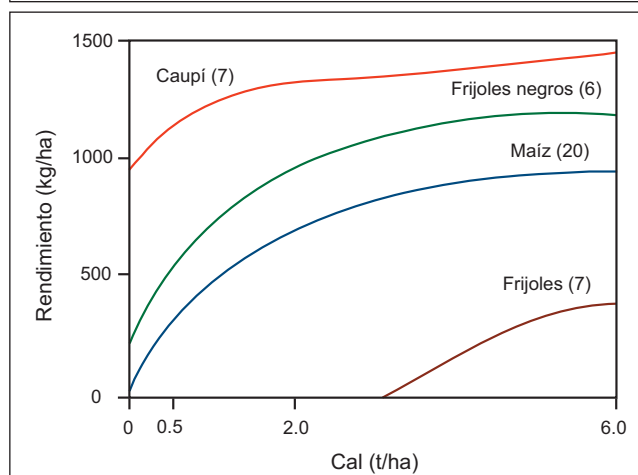
V1 = Porcentaje de saturación de bases deseado  
 V2 = Porcentaje de saturación de bases que presenta el suelo  
 CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva  
 f = 100/PRNT  
 PRNT = Poder relativo de neutralización total

### **Método combinado**

Esta fórmula modificada combina los criterios prácticos de las dos anteriores. Se expresa en términos de porcentaje de saturación de acidez y se incluye el fac-



**Figura 3. Efecto del encalado en el rendimiento de cuatro variedades de arroz de secano en un Oxisol de Colombia (adaptado de Sánchez, 1987).**



**Figura 4. Efecto del encalado en el rendimiento de diferentes especies sembradas en un Oxisol de Colombia. La cifra entre paréntesis indica el número de genotipos probados por especie (Sánchez, 1987).**

tor f de calidad del material encalante. Al hacer esto, la constante se disminuye a 1.5 pues quedan menos factores de eficiencia de la neutralización sin contemplar. La fórmula completa se presenta a continuación:

$$\text{CaCO}_3(\text{t/ha}) = \frac{1.5 (\text{Al} - \text{PRS}) (\text{C I C E})}{100} \times f \quad (25)$$

de donde:

Al = Porcentaje de saturación de Al actual  
PRS = Porcentaje de saturación de Al deseado

**Tabla 19. Porcentaje recomendado de saturación de aluminio (PRS) para cultivos en producción (Bertsch, 1995).**

| Cultivo        | PRS <sup>1</sup> (%) |
|----------------|----------------------|
| Banano         | <15                  |
| Cacao          | <20                  |
| Café           | <25                  |
| Camote         | <20                  |
| Caña de azúcar | <20                  |
| Caupí          | <40                  |
| Cítricos       | <20                  |
| Coco           | <30                  |
| Frijol negro   | <20                  |
| Gandul         | <40                  |
| Maíz           | <25                  |
| Mango          | <20                  |
| Maní           | <25                  |
| Palma aceitera | <15                  |
| Papa           | <20                  |
| Pejibaye       | <25                  |
| Piña           | <30                  |
| Plátano        | <25                  |
| Sorgo          | <20                  |
| Soya           | <10                  |
| Trigo          | <10                  |
| Yuca           | <60                  |

**1. Estos valores de PRS han sido estimados a través de la práctica**

Dentro de las reacciones paralelas que se incluyen en la constante están la neutralización del Al no intercambiable, las correcciones de peso/volumen que pueden ser necesarias para ajustar el encalado a una profundidad de incorporación de 15 cm (Yost et al., 1990) y para neutralizar los nuevos puntos de carga negativa generados en muchos coloides en medios básicos al ionizar sus OH terminales.

A continuación se muestran tres ejemplos de resultados de análisis de suelos para el cálculo de necesidades de encalado utilizando el método combinado (Tablas 20 a, b y c).

Las dosis de encalado normalmente recomendadas en muchos países de América Latina oscilan entre 0.5 y 3 t/ha. Sin embargo, los resultados de experimentos y pruebas comerciales recientes han mostrado que, en suelos fuertemente ácidos, los cultivos responden a dosis mayores de cal. Esto indica que en circunstan-

cias donde es posible y económico es preferible utilizar la cal necesaria para precipitar todo el Al.

Ejemplos de esta condición se presentan a continuación.

Salas et al. (1996) encontraron respuesta casi lineal a la aplicación de cal en tiquisque blanco (*Xanthosoma sagittifolium*) sembrado en un Ultisol de Costa Rica (Tabla 21). La dosis más alta (4 t/ha) no logró maximizar el rendimiento, demostrando que incluso esta dosis fue probablemente insuficiente.

**Tabla 20a. Cálculos del requerimiento de cal en tres suelos ácidos de Costa Rica utilizando la fórmula combinada (Sarapiquí).**

| Horquetas de Sarapiquí                                                                                                           |                        |                |     |                                  |      |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|-----|----------------------------------|------|---------|
|                                                                                                                                  |                        | Suelo          | :   | Typic Hapludult                  |      |         |
|                                                                                                                                  |                        | Cultivo        | :   | Pejibaye para palmito            |      |         |
|                                                                                                                                  |                        | PRNT de la cal | :   | 86% (determinada en laboratorio) |      |         |
|                                                                                                                                  |                        | SAR deseado    | :   | 25% (Tabla 19)                   |      |         |
| Análisis de suelos                                                                                                               |                        |                |     |                                  |      |         |
| pH                                                                                                                               | Ca                     | Mg             | K   | Al                               | CICE | Sat. Al |
|                                                                                                                                  | ----- cmol (+)/L ----- |                |     |                                  |      | %       |
| 4.6                                                                                                                              | 0.5                    | 0.3            | 0.3 | 2.1                              | 3.2  | 66      |
| Recomendación de Cal                                                                                                             |                        |                |     |                                  |      |         |
| <div><math display="block">\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{1.5 (66 - 25) 3.2}{100} \times \frac{100}{86} = 2.3</math></div> |                        |                |     |                                  |      |         |

**Tabla 20b. Cálculos del requerimiento de cal en tres suelos ácidos de Costa Rica utilizando la fórmula combinada (Sabanilla, Alajuela).**

| Sabanilla, Alajuela                                                                                                             |                        |                |      |                                  |      |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|------|----------------------------------|------|---------|
|                                                                                                                                 |                        | Suelo          | :    | Typic Haplustand                 |      |         |
|                                                                                                                                 |                        | Cultivo        | :    | Café                             |      |         |
|                                                                                                                                 |                        | PRNT de la cal | :    | 80% (determinada en laboratorio) |      |         |
|                                                                                                                                 |                        | SAR deseado    | :    | 25% (Tabla 19)                   |      |         |
| Análisis de suelos                                                                                                              |                        |                |      |                                  |      |         |
| pH                                                                                                                              | Ca                     | Mg             | K    | Al                               | CICE | Sat. Al |
|                                                                                                                                 | ----- cmol (+)/L ----- |                |      |                                  |      | %       |
| 4.7                                                                                                                             | 1.7                    | 0.4            | 0.37 | 3.1                              | 5.57 | 54      |
| Recomendación de Cal                                                                                                            |                        |                |      |                                  |      |         |
| <div><math display="block">\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{1.5 (54 - 25) 5.57}{100} \times \frac{100}{80} = 3</math></div> |                        |                |      |                                  |      |         |

**Tabla 20c. Cálculos del requerimiento de cal en tres suelos ácidos de Costa Rica utilizando la fórmula combinada (Pital, San Carlos).**

| Pital, San Carlos                                                                                                                 |       |                |            |                                  |      |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------|------------|----------------------------------|------|---------|
|                                                                                                                                   |       | Suelo          | :          | Typic Hapludult                  |      |         |
|                                                                                                                                   |       | Cultivo        | :          | Naranja                          |      |         |
|                                                                                                                                   |       | PRNT de la cal | :          | 70% (determinada en laboratorio) |      |         |
|                                                                                                                                   |       | SAR deseado    | :          | 25% (Tabla 19)                   |      |         |
| Análisis de suelos                                                                                                                |       |                |            |                                  |      |         |
| pH                                                                                                                                | Ca    | Mg             | K          | Al                               | CICE | Sat. Al |
|                                                                                                                                   | ----- |                | cmol (+)/L | -----                            |      | %       |
| 4.7                                                                                                                               | 1.8   | 0.3            | 0.41       | 2.6                              | 5.11 | 51      |
| Recomendaciones de Cal                                                                                                            |       |                |            |                                  |      |         |
| <div><math display="block">\text{CaCO}_3 \text{ (t/ha)} = \frac{1.5 (51 - 25) 5.11}{100} \times \frac{100}{70} = 2.3</math></div> |       |                |            |                                  |      |         |

**Tabla 21. Efecto de la aplicación de cal en el rendimiento de tiquisque blanco (*Xanthosoma sagittifolium*) en un Ultisol de Sarapiquí, Costa Rica (Salas et al., 1996).**

| Calcita          | Rend. | Dolomita | Rend. |
|------------------|-------|----------|-------|
| ----- t/ha ----- |       |          |       |
| 0                | 9.9   |          |       |
| 1                | 10.0  | 1        | 8.6   |
| 2                | 14.3  | 2        | 14.8  |
| 3                | 15.4  | 3        | 15.4  |
| 4                | 17.2  | 4        | 16.4  |

Investigación en naranja Valencia conducida en un Ultisol de Grecia, Costa Rica, con 66% de saturación de Al encontró respuesta lineal a la aplicación de diferentes dosis de cal (Tabla 22). La dosis más alta (3 t/ha) produjo el mejor rendimiento luego de tres cosechas de fruta (1995 a 1997).

En dos de los tres años evaluados, la dosis de 3 t/ha produjo más del doble de rendimiento que el testigo sin cal, independientemente de la fuente utilizada, como se observa en la Foto 24 (Rojas et al., 1996).

**Tabla 22. Efecto de la aplicación de cal en el rendimiento de naranja Valencia en un Ultisol de Grecia, Costa Rica, durante el período 1995-1997 (Rojas et al., 1996).**

| Tratamientos                                                       | Dosis<br>t/ha | ----- Cajas/ha ----- |     |      | ----- LSST/ha* ----- |      |      |
|--------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------|-----|------|----------------------|------|------|
|                                                                    |               | 95                   | 96  | 97   | 95                   | 96   | 97   |
|                                                                    | 0             | 113                  | 141 | 592  | 353                  | 392  | 1832 |
| CaCO <sub>3</sub>                                                  | 1             | 267                  | 145 | 782  | 973                  | 432  | 2386 |
| CaCO <sub>3</sub>                                                  | 2             | 423                  | 269 | 1017 | 1398                 | 754  | 3191 |
| CaCO <sub>3</sub>                                                  | 3             | 551                  | 204 | 1225 | 1832                 | 604  | 3949 |
| CaCO <sub>3</sub> + MgO**                                          | 1             | 244                  | 183 | 895  | 883                  | 512  | 2791 |
| CaCO <sub>3</sub> + MgO                                            | 2             | 358                  | 203 | 1042 | 1236                 | 583  | 3241 |
| CaCO <sub>3</sub> + MgO                                            | 3             | 558                  | 292 | 1242 | 1860                 | 1036 | 3574 |
| * LSST = Libras de sólidos solubles totales.                       |               |                      |     |      |                      |      |      |
| ** Mezcla física de 85% de CaCO <sub>3</sub> y 15% de MgO (Magox). |               |                      |     |      |                      |      |      |



Foto 24. Respuesta de la naranja a la aplicación de cal en Ultisoles de Costa Rica.

## REQUERIMIENTOS DE CAL EN ANDISOLES

Los Andisoles (suelos derivados de ceniza volcánica) cubren una apreciable área en América Latina y son particularmente importantes porque son zonas de alta presión demográfica. Condiciones típicas se presentan en las Fotos 25 y 26. Estos suelos tienen una alta capacidad tampón (resistencia al cambio de pH) y una moderada CIC. 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 y en otros sobrestima la necesidad de cal en Andisoles. Se observa en los datos presentados en la Tabla 22 que utilizando los criterios anteriores, se debería utilizar 3 t/ha de cal (2.1 cmoles de acidez x 1.5). En este caso, esta cantidad de cal obviamente no es suficiente para precipitar el Al y permitir un buen rendimiento de los cultivos, particularmente en cultivos sensibles a la acidez como los prevalentes en las zonas altas de los Andes de América Latina.

La alta capacidad tampón de los Andisoles se debe a que las arcillas resultantes de la meteorización de las cenizas volcánicas (alofana, imogolita y complejos humus-Al) tienen una superficie muy reactiva. En este caso los OH<sup>-</sup> producidos por hidrólisis del ion CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>

(producto de las reacciones de la cal) crean carga en la superficie de las arcillas por deprotonización (pérdida de H<sup>+</sup>) y consecuentemente no incrementan el pH de la solución del suelo, pero incrementan la CIC (carga variable), como se describe a continuación:



Esta resistencia al cambio de pH de los suelos de carga variable (Andisoles, Ultisoles y Oxisoles) 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 Al<sup>3+</sup> (5.3-5.5). Sin embargo, en Andisoles, la cantidad de cal necesaria para precipitar el Al depende de la magnitud de la capacidad tampón, cosa que a su vez varía con la edad y el estado de meteorización de la ceniza volcánica. Por esta razón, los métodos tradicionales de determinar los requerimientos de cal en suelos de carga variable no funcionan adecuadamente en Andisoles y es necesario conducir experimentos simples que determinen exactamente los requerimientos de cal de un sitio específico. En el caso del ejemplo de la Tabla 23, la capacidad tampón del suelo es muy alta y es necesario aplicar 6 t/ha de cal para precipitar el Al<sup>3+</sup> y producir buenos rendimientos de cultivos susceptibles al Al<sup>3+</sup> (Foto 27).

En otros Andisoles, la capacidad tampón es menor y en consecuencia se debe aplicar menor cantidad de cal. En estos casos, se ha sugerido que la determinación de Al<sup>3+</sup> con KCl 1N no es eficiente porque su fuerza iónica extrae formas de Al, particularmente ligadas con la materia orgánica, que no pasan a ser parte del Al<sup>3+</sup> activo tóxico para las plantas (Zapata, 1996). El encontrar un método de laboratorio que pueda discriminar estas formas de Al en el suelo podría ayudar a encontrar una forma más eficiente de determinar los requerimientos de cal en Andisoles.

## EXPERIMENTOS SIMPLES PARA DETERMINAR LAS NECESIDADES DE CAL

En ocasiones es necesario conducir experimentos de campo simples para determinar los requerimientos de cal. Esto se logra al comparar la respuesta del cultivo

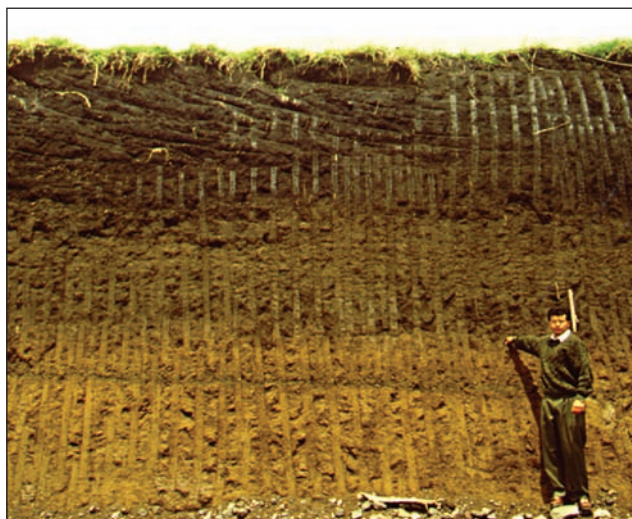
**Tabla 23. Efecto de la aplicación de cal en las propiedades químicas y el rendimiento de varios cultivos en un Andisol de Ecuador.**

| CaCO <sub>3</sub>                    | pH  | Al                        | K    | Ca   | Mg   | CIC* | -----Rendimientos----- |        |       |
|--------------------------------------|-----|---------------------------|------|------|------|------|------------------------|--------|-------|
| t/ha                                 |     | ----- cmoles (+) kg ----- |      |      |      |      | 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 |     |                           |      |      |      |      |                        |        |       |

\* CIC medida con una sal indiferente



**Foto 25. Paisaje típico de Andisoles de América Latina.**



**Foto 26. Perfil de un Andisol típico en Ecuador.**



**Foto 27. Efecto del encalado en el rendimiento de haba (*Vicia faba*) en Andisoles del Ecuador.**

con dosis definidas de la enmienda. En suelos ácidos la respuesta al encalado es obvia, pero, cuando no existen recomendaciones concretas de dosis de cal, como en el caso de los Andisoles, experimentos simples de campo permiten determinar la cantidad de cal necesaria para eliminar la acidez como limitante para el cultivo.

El experimento se inicia marcando algunas parcelas de igual tamaño en una sección del campo que sea uniforme y representativa. El tamaño de las parcelas puede estar alrededor de 25 m<sup>2</sup> (5 X 5 m), pero esto depende de la disponibilidad de terreno y de la facilidad para manejar el experimento. En lo posible, es aconsejable tener por lo menos tres repeticiones de los tratamientos acomodadas al azar en bloques. Cada una de las parcelas debe recibir primero una apli-

cación básica de fertilizante para asegurar que el suplemento de los nutrientes esenciales sea adecuado y que permita que se exprese bien el efecto de la cal a estudiarse (Hicks, et al., 1997; Caudle, 1991; Nelson, 1999).

A continuación se debe aplicar e incorporar completamente la cal en la parcela. Una parcela no debe llevar cal (testigo) y se aconseja cubrir un buen rango de dosis para asegurar la respuesta, por ejemplo, dosis de 0, 1.5, 3.0 y 6.0 toneladas de cal por hectárea. La cantidad de cal a aplicarse en cada parcela se determina relacionando la superficie de la parcela con la superficie de una hectárea. En una parcela de 25 m<sup>2</sup> la aplicación de 2.5 kg de cal de buena calidad equivale aproximadamente a 1.0 t/ha. Partiendo de esta relación se pueden calcular otras dosis (Hicks, et al., 1997; Caudle, 1991).

Se siembra y se maneja el cultivo como normalmente se lo hace en la finca. A partir de este punto se empieza a documentar la diferencias en germinación, crecimiento, apariencia de las plantas, etc. en cada una de las parcelas. A la cosecha se compara el rendimiento de las parcelas con cal con el testigo y se determina el mejor tratamiento. Si se tiene acceso a un laboratorio es importante determinar el contenido de Al en el suelo a la cosecha para determinar cual es la dosis más baja de cal que reduzca el contenido de Al a niveles que no causen detrimento en el crecimiento y producción del cultivo que se esta probando. Esto ayuda a determinar la dosis de cal más eficiente. Si se sospecha que la dosis adecuada de cal se encuentra entre dos de los tratamientos probados, es aconsejable ajustar la recomendación probando las nuevas dosis en otro experimento en otro sitio en la finca (Hicks, et al., 1997; Caudle, 1991).

Se recomienda mantener el experimento en el campo por varios años sin aplicar más cal. Esto permite estudiar el efecto residual de la aplicación de cal y determinar cada cuanto tiempo se debe volver a encalar el suelo.

### APLICACION DE CAL EN SUELOS BAJO SIEMBRA DIRECTA

La siembra directa se caracteriza porque no se remueve el suelo para la siembra o para la aplicación de fertilizantes y enmiendas. De esta forma se acumulan, año tras año, los residuos del cultivo en la superficie del suelo. La siembra del cultivo siguiente se

hace con equipo especial que corta los residuos y coloca la semilla y el fertilizante a profundidad adecuada sin remover el suelo como se hace en labranza convencional. Este es un método de cultivo que se ha extendido rápidamente en Norte América y en países de América Latina como México, Argentina, Chile y Brasil. Además, la siembra directa tiene mucho potencial en otros países de la región.

En siembra directa existen los mismos problemas de acidez que en siembra convencional, que por supuesto requieren controlarse a través de encalado. La corrección de este problema se logra aplicando cal, pero a diferencia del encalado en labranza convencional, donde se debe incorporar la cal completamente en la capa arable para obtener un buen control de acidez, las condiciones creadas por siembra directa permiten una mejor efectividad de la cal aplicada a la superficie.

En siembra directa, la zona de actividad radicular es superficial debido a la estratificación de la materia orgánica, y de las condiciones químicas y físicas del suelo como se observa en la Tabla 24. En estas condiciones, la cal puede penetrar en el primer estrato superficial (0-5 cm) mejorando las condiciones de acidez. Investigación conducida en suelos de regiones templadas y subtropicales ha documentado el hecho de que en siembra directa, la aplicación superficial de cal controla adecuadamente la acidez, como lo demuestran los datos de investigación conducida en suelos del sur de Brasil que se presentan en la Tabla 25.

Por ser nueva la difusión de la siembra directa en suelos tropicales no existen datos experimentales que documenten el efecto de la aplicación superficial de cal. Sin embargo, la experiencia en Oxisoles del Cerrado Brasileño demuestra que aplicaciones superficiales de cal son efectivas para corregir la acidez. La dosis máxima de cal usada ha sido 2 t/ha, cada 2 años (Landers, 1994). Un aspecto interesante en siembra directa es la acumulación de materia orgánica en los primeros centímetros de perfil del suelo. La materia orgánica ayuda en el control de acidez ya que retiene parte del Al<sup>3+</sup> eliminado parcialmente su efecto tóxico (Caudle, 1991).

La utilización de yeso (CaSO<sub>4</sub>) en siembra directa permite mejorar las condiciones del suelo en la subsuperficie, en zonas donde no puede llegar la cal. El movimiento del yeso a través del perfil permite que

**Tabla 24. Efecto de la labranza en la distribución de la materia orgánica, CIC, K, Ca y Mg en suelos de la Finca Chequén, Chile (adaptado de Crovetto, 1996).**

| Profundidad<br>cm                   | Materia orgánica<br>% | CIC<br>----- | K<br>cmol(+)/kg | Ca<br>----- | Mg<br>----- |
|-------------------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|
| Labranza convencional, 5 años trigo |                       |              |                 |             |             |
| 0-5                                 | 1.42                  | 11           | 0.49            | 4.75        | 2.02        |
| 5-10                                | 1.24                  | 11           | 0.47            | 5.50        | 2.14        |
| 10-20                               | 1.00                  | 11           | 0.45            | 4.88        | 2.02        |
| Siembra directa, 7 años trigo-maíz  |                       |              |                 |             |             |
| 0-5                                 | 5.32                  | 18           | 0.83            | 12.00       | 2.43        |
| 5-10                                | 2.84                  | 13           | 0.61            | 7.00        | 1.67        |
| 10-20                               | 2.24                  | 13           | 0.47            | 7.00        | 2.06        |

**Tabla 25. Efecto del encalado en una rotación de cultivos en siembra convencional y en siembra directa en Passo Fundo y Sarandi, Brasil (adaptado de Pottker y Ben, 1998).**

| Tratamientos                                                    | Efecto<br>Inmediato | Efecto residual ----- |              |                  |              |        |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|------------------|--------------|--------|
|                                                                 | Soya<br>1994        | Trigo<br>1994/95      | Maíz<br>1995 | Avena<br>1995/96 | Soya<br>1996 | Cebada |
| ----- kg/ha -----                                               |                     |                       |              |                  |              |        |
| Passo Fundo*                                                    |                     |                       |              |                  |              |        |
| Testigo                                                         | 2290                | 1773                  | 4307         | 1588             | 2548         | 1515   |
| Cal incorporada                                                 | 2704                | 2180                  | 4874         | 2075             | 3092         | 3259   |
| Cal superficial                                                 | 2737                | 1875                  | 4940         | 1954             | 3184         | 3241   |
| Sarandi**                                                       |                     |                       |              |                  |              |        |
| Testigo                                                         | 2841                | 2172                  | 6464         | 1550             | 2775         | 2018   |
| Cal incorporada                                                 | 3185                | 2337                  | 7359         | 1622             | 3260         | 3550   |
| Cal superficial                                                 | 3181                | 2393                  | 7308         | 1637             | 3336         | 3437   |
| * 10.7 de cal t/ha                                              |                     |                       |              |                  |              |        |
| ** 7.2 de cal t/ha. Dosis determinadas por el método SMP buffer |                     |                       |              |                  |              |        |

éste llegue a cierta profundidad donde puede ser fuente de calcio (Ca) y de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). El  $\text{SO}_4^{2-}$  que puede actuar como nutriente, pero fundamentalmente es una especie iónica que tiene gran afinidad por cationes, principalmente aluminio (Al).

Este proceso permite mover a zonas más profundas el Al como  $\text{AlSO}_4^+$ , eliminando la toxicidad de este metal (Raij, 1992; Silva et al., 1998). Esta práctica se usa con éxito en suelos bajo siembra directa en el Cerrado Brasileño (Landers, 1994).

## 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. El efecto del  $Al^{+3}$  en el crecimiento de las raíces de los cultivos se observa en las Fotos 28 y 29. El efecto dramático de la cal sobre la precipitación de Al y el crecimiento de las raíces se presenta en las Foto 30 y 31.

### DISPONIBILIDAD DE FOSFORO

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

Aquellos suelos dominados por arcillas de tipo 2:1 (esmeditas) no tienen una superficie reactiva y



Foto 28. Efecto del  $Al^{+3}$  en el crecimiento de las raíces de café.

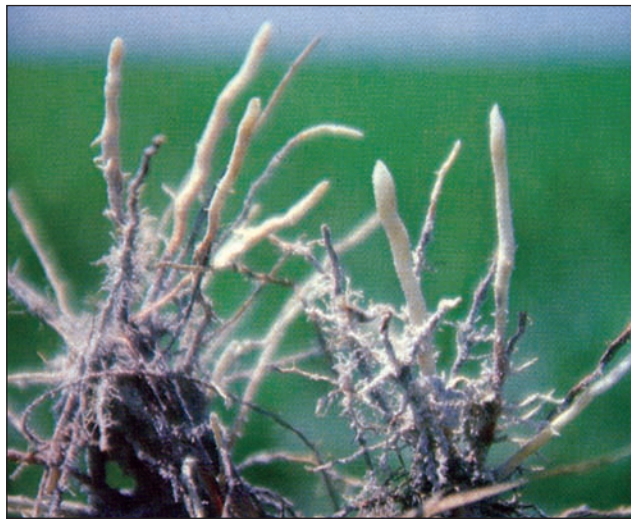


Foto 29. Efecto del  $Al^{+3}$  en el crecimiento de las raíces de la caña de azúcar.



Foto 30. Efecto del encalado en el crecimiento de las raíces de café.

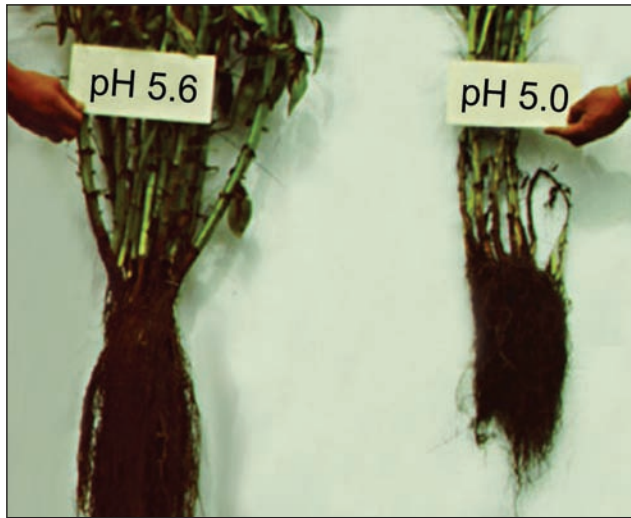


Foto 31. Efecto del encalado en el crecimiento de las raíces de haba (*Vicia Faba*).

retienen modestas cantidades de P en la superficie. 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), a partir de aproximadamente pH 6.5, 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 7.5 y un adecuado programa de encalado es esencial para elevar el pH a este rango y reducir de esta forma la fijación de P. La Figura 5 ilustra el efecto del pH del suelo en la fijación de P en los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1.

Los mecanismos de fijación en los suelos altamente meteorizados de los trópicos (Ultisoles y Oxisoles) 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 pre-

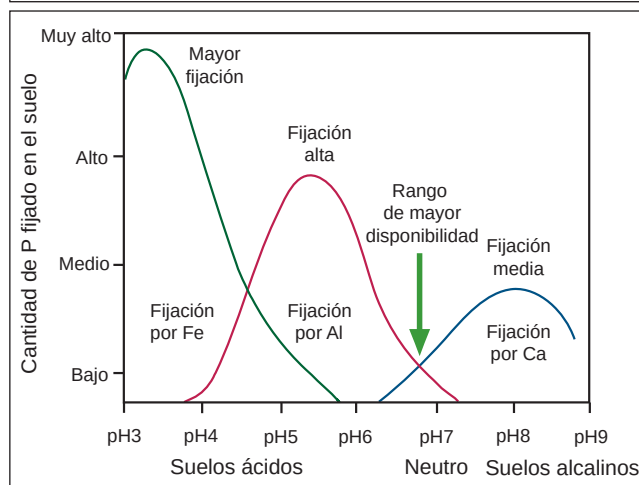
sentes en estos suelos. Este proceso retiene apreciable cantidad de P en un rango de pH de 5.0 a 7.0 (Figura 6).

En los suelos tropicales viejos, el Al y Fe presentes en los minerales arcillosos son estables hasta pH 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.

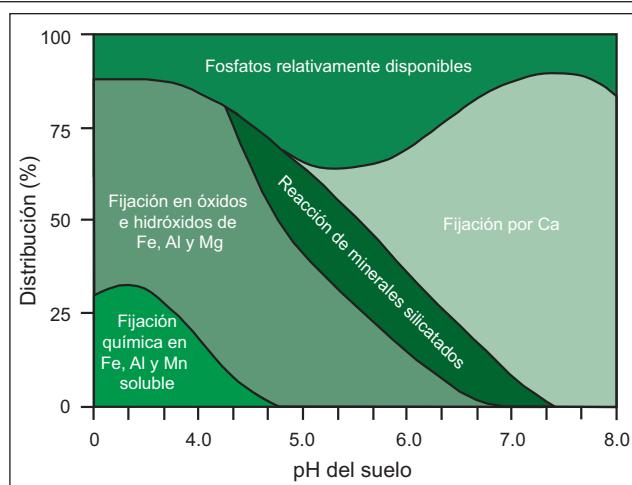
El efecto del encalado en suelos tropicales generalmente lleva a confusión con respecto a la disponibilidad de P. La aplicación de cal en suelos tropicales corrige la toxicidad de Al y la deficiencia de Ca y la corrección de estos factores permite un incremento de la absorción de P aun cuando el encalado tiene muy poco efecto en la disponibilidad y fijación de P principalmente a pH mayor 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. En la mayoría de los casos, una vez que se han controlado otras limitaciones del crecimiento, el

**Tabla 26. Respuesta a la aplicación de P en suelos de diferente capacidad de fijación.**

| Soya<br>Ultisol<br>(Venezuela) |       | Arroz secano<br>Ultisol<br>(Panamá) |       | Arroz secano<br>Oxisol<br>(Brasil) |       | Papas<br>Andisol<br>(Ecuador) |       |
|--------------------------------|-------|-------------------------------------|-------|------------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | Rend. | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>       | Rend. | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | Rend. | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 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 |



**Figura 5. Efecto del pH del suelo en la fijación de P en los suelos dominados por arcillas de tipo 2:1.**



**Figura 6. Distribución de la fijación de P de acuerdo al tipo de arcilla y al pH del suelo (Brady, 1976).**

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 apreciables cantidades de P para obtener buenos rendimientos. Ejemplos de la respuesta al P en Ultisoles, Oxisoles y Andisoles se presentan en la Tabla 26.

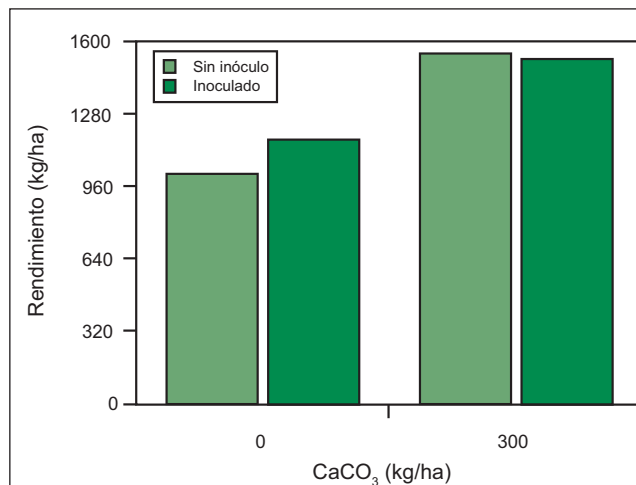
## FIJACION DE NITROGENO

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 27.

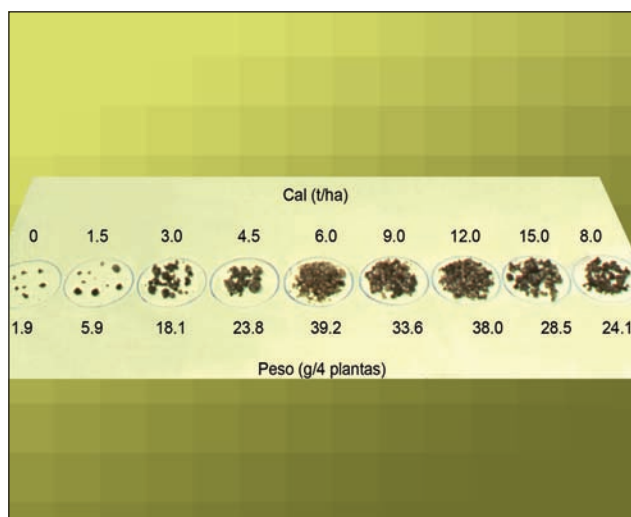
Dentro de la actividad microbiana, el proceso de fijación de N atmosférico es favorecido por el encalado. La actividad de las especies de *Rhizobium* en las leguminosas se restringe a pH bajo. El encalado permite un mayor crecimiento de las leguminosas debido a que éstas pueden fijar una cantidad mayor de N gra-

**Tabla 27. Efecto de la aplicación de cal en la población microbiana de suelos ácidos del Cerrado, Brasil (Malavolta et al., 1991).**

| Tratam. | Suelo 1<br>--- millones de bacterias/g de suelo --- | Suelo 2 | Suelo 3 | Suelo 4 |
|---------|-----------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| Sin cal | 20                                                  | 100     | 890     | 340     |
| Con cal | 480                                                 | 190     | 1000    | 1290    |



**Figura 7. Efecto del encalado en el rendimiento de frijol con y sin previa inoculación en Ultisoles de Venezuela (Gutiérrez, 1992).**



**Foto 32. Efecto del encalado en el número de nódulos por planta en el cultivo del haba (*Vicia faba*).**

cias a las adecuadas condiciones para el desarrollo de la bacteria como se ilustra en los ejemplos de la Figura 7 y la Foto 32.

## PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

El encalado de suelos ácidos tiene un efecto positivo en estructura del suelo debido a la acción floculante de la cal per se y a la acción floculante y cementante de los óxidos e hidróxidos de Fe y Al formados como producto de la adición de la cal. Se considera que la acción floculante y cementante los hidróxidos de Al formados después del encalado mejora apreciablemente la agregación de los suelos ácidos con alto contenido de Al intercambiable (Roth, et al., 1986; Haynes y Naidu, 1998).

Se ha demostrado que el encalado incrementa la población, el tamaño y la actividad de las lombrices de tierra que son muy sensitivas a condiciones ácidas del suelo. El aumento en la actividad y población de las lombrices tiene un efecto significativo en la estructura del suelo y la acción barrenadora de las lombrices incrementa los macroporos. Todo esto mejora las condiciones físicas del suelo (Haynes y Naidu, 1998).

Por otro lado, las aplicaciones de cal también mejoran la estabilidad de los agregados del suelo por mecanismos indirectos. Está demostrado que el encalado incrementa el rendimiento de los cultivos, lo que a su vez incrementa la cantidad de residuos que retornan al suelo incrementando el contenido de materia orgánica. Las moléculas de humus y de polisacáridos de la

materia orgánica son las encargadas de mantener juntos los agregados del suelo (Haynes y Naidu, 1998)

cas agronómicas se observa en el rendimiento y en la rentabilidad de los cultivos como lo ilustra la Tabla 30

## RESPUESTA A LA FERTILIZACION

El encalado mejora la respuesta a la aplicación de fertilizantes en suelos ácidos. Esto se debe fundamentalmente a las mejores condiciones físicas y químicas que el suelo adquiere después de la aplicación de la cal, produciendo un mejor ambiente para el desarrollo radicular. Una mejor exploración del suelo permite que la planta absorba los nutrientes de los fertilizantes aplicados al suelo incrementando los rendimientos del cultivo y la eficiencia de los fertilizantes. Alvarado et al. (1989) y León (1998), trabajando con maíz, encontraron una mejor respuesta en rendimiento a la aplicación de N, P y K en Ultisoles de Bolivia y a la aplicación de P en Oxisoles de Colombia, después de la aplicación de dosis moderadas de cal como se observa en las Tablas 28 y 29.

El efecto de la fertilización balanceada se expresa mejor cuando la acidez ha sido eliminada como factor limitante. En este caso, la efectividad de estas prácti-

**Tabla 28. Efecto de la relación fertilizante/cal en el rendimiento de maíz var. Tuxpeño, Chapare, Bolivia.**

| Fertilizante (kg/ha)          | ----- CaCO <sub>3</sub> (t/ha) ----- |     |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----|
|                               | 0                                    | 1   |
| Rendimiento de grano (t/ha)   |                                      |     |
| N                             |                                      |     |
| 0                             | 1.2                                  | 1.3 |
| 75                            | 1.0                                  | 1.8 |
| 150                           | 1.7                                  | 1.9 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |                                      |     |
| 0                             | 0.7                                  | 1.8 |
| 100                           | 1.2                                  | 2.5 |
| 150                           | 1.3                                  | 2.3 |
| K <sub>2</sub> O              |                                      |     |
| 0                             | 1.0                                  | 1.6 |
| 75                            | 1.3                                  | 2.2 |
| 150                           | 1.5                                  | 2.5 |

**Tabla 29. Efecto de la aplicación de dolomita en la respuesta del maíz a dosis crecientes de P en Oxisoles de Colombia (adaptado de León, 1998).**

| ----- La Libertad ----- |          |                     |         | ----- Carimagua ----- |          |                     |         |
|-------------------------|----------|---------------------|---------|-----------------------|----------|---------------------|---------|
| P aplicado              | Dolomita | Rendimiento de maíz |         | P aplicado            | Dolomita | Rendimiento de maíz |         |
|                         |          | Sikuani             | Tuxpeño |                       |          | Sikuani             | Tuxpeño |
| ----- kg/ha -----       |          |                     |         |                       |          |                     |         |
| 0                       | 1.02     | 2537                | 1818    | 0                     | 1.35     | 170                 | 45      |
|                         | 1.82     | 3070                | 3039    |                       | 2.16     | 370                 | 132     |
|                         | 2.61     | 2607                | 2785    |                       | 2.95     | 176                 | 212     |
| 18                      | 1.02     | 2825                | 2095    | 26                    | 1.35     | 1602                | 1431    |
|                         | 1.82     | 3070                | 3116    |                       | 2.16     | 1741                | 1746    |
|                         | 2.61     | 2821                | 3236    |                       | 2.95     | 2722                | 2733    |
| 36                      | 1.02     | 2948                | 2612    | 52                    | 1.35     | 2281                | 2018    |
|                         | 1.82     | 3199                | 3238    |                       | 2.16     | 2747                | 2349    |
|                         | 2.61     | 2876                | 3359    |                       | 2.95     | 2871                | 2825    |
| 54                      | 1.02     | 3203                | 2900    | 78                    | 1.35     | 2797                | 2243    |
|                         | 1.82     | 3310                | 3313    |                       | 2.16     | 2589                | 2334    |
|                         | 2.61     | 3272                | 3661    |                       | 2.95     | 3223                | 3058    |

\* Dosis de dolomita calculadas para llegar a una saturación de Al de 65, 50 y 35% respectivamente, utilizando la fórmula de Cochrane et al. (1980).

\*\* Dosis de P aplicadas de acuerdo al contenido inicial en el suelo.

\*\*\* N aplicado en una dosis de 90 kg/ha en todas las parcelas en los dos sitios; K aplicado a todas las parcelas en dosis de 50 y 83 kg/ha en la Libertad y Carimagua respectivamente.



Foto 33. El efecto de la fertilización balanceada se expresa mejor después de corregir los problemas de acidez (La Frailesca, Chiapas, México).

Tabla 30. Efecto de la aplicación de cal y fertilización balanceada en el rendimiento y la rentabilidad del cultivo del maíz en La Frailesca, Chiapas, México (Lazcano, 1999).

| Dosis de fertilización<br>N - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - K <sub>2</sub> O - Mg - S<br>----- kg/ha ----- | Cal  | Rendimiento | Costo<br>US\$/ha | Punto de<br>Equilibrio<br>t/ha | Ingreso<br>bruto<br>----- US\$/ha ----- | Ingreso<br>neto<br>----- |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
| 0 - 0 - 0                                                                                                    | 0    | 2900        | 270              | 1999                           | 393                                     | 122                      |
| 0 - 0 - 0                                                                                                    | 1000 | 2750        | 355              | 2600                           | 373                                     | 177                      |
| 180 - 69 - 60                                                                                                | 0    | 3700        | 394              | 2930                           | 501                                     | 103                      |
| 180 - 69 - 60                                                                                                | 1000 | 5050        | 498              | 3670                           | 678                                     | 179                      |
| 266 - 92 - 202 - 11 - 22                                                                                     | 1000 | 6085        | 608              | 4480                           | 813                                     | 205                      |

que presenta datos de fertilización y encalado de suelos ácidos de la localidad la Frailesca, estado de Chiapas, México (Foto, 33) (Lazcano, 1999).

## IMPORTANCIA DEL MAGNESIO EN SUELOS ACIDOS

El Mg es un elemento importante en la nutrición de las plantas ya que forma parte de la molécula de clorofila, pigmento que da el color verde a las hojas. Además, este nutriente participa en la fotosíntesis, como activador de la respiración, en el balance electrolítico y en otros procesos metabólicos. La deficiencia de Mg es muy común en suelos Ultisoles y Oxisoles ácidos y en muchos Andisoles como se observan en las Foto 34 y 35.

La deficiencia de Mg se puede corregir de varias formas, sin embargo, las fuentes son escasas y algunas de ellas de alto costo. Los fertilizantes portadores de Mg son eficaces para corregir deficiencias, pero, por lo

general, no dejan un efecto residual prolongado en el suelo por ser sales minerales de alta solubilidad que se aplican en dosis relativamente moderadas. La Tabla 31 presenta algunas de las principales fuentes de Mg para los cultivos.

Por lo general, la deficiencia de Mg se presenta en suelos con problemas de acidez y bajo contenido de Ca. Por esta razón, el uso de cal en estos suelos es una práctica necesaria. La cal dolomítica puede ser una alternativa eficaz en suelos ácidos ya que además de corregir la acidez del suelo, también suple Ca y Mg al cultivo. Por ser una enmienda que reacciona lentamente en el suelo, la dolomita mantiene un efecto residual prolongado, al contrario de los fertilizantes que son más solubles y susceptibles de perderse por lixiviación.

El óxido de Magnesio, con un contenido entre 60 y 90% de MgO, es la fuente de mayor concentración de este elemento. Normalmente se utiliza como materia

**Tabla 31. Fertilizantes que suministran magnesio.**

| Fuente                                                                 | N      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO | CaO | S  |
|------------------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------|------------------|-----|-----|----|
|                                                                        | -----% |                               |                  |     |     |    |
| Sulpomag (K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> • MgSO <sub>4</sub> )         | --     | --                            | 22               | 18  | --  | 22 |
| Sulfato de Mg (MgSO <sub>4</sub> • 7 H <sub>2</sub> O)                 | --     | --                            | --               | 17  | --  | 14 |
| Kieserita (MgSO <sub>4</sub> • H <sub>2</sub> O)                       | --     | --                            | --               | 25  | --  | 20 |
| Nitromagnesio                                                          | 20     | --                            | --               | 7   | --  | -- |
| Nitrato de Mg [Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> • 6 H <sub>2</sub> O] | 11     | --                            | --               | 15  | --  | -- |
| Nitrato amonio calcáreo                                                | 20     | --                            | --               | 8   | 11  | -- |

**Tabla 32. Efecto del uso de CaCO<sub>3</sub> sólo y en combinación con MgO (Magox) en el rendimiento de pejobaye para palmito y en la fertilidad del suelo en un suelo ácido de Sarapiquí, Costa Rica (Ortega, et al., 1996).**

| Tratamientos              | Palmitos/ha/año | Palmitos/caja | pH* | Ca<br>----- cmoles(+)/L ----- | Mg   | Al   | S.A<br>% |
|---------------------------|-----------------|---------------|-----|-------------------------------|------|------|----------|
| CaCO <sub>3</sub> **      | 14 903          | 36.1          | 4.9 | 5.68                          | 0.36 | 1.44 | 18       |
| CaCO <sub>3</sub> +MgO*** | 15 437          | 39.8          | 5.1 | 5.08                          | 1.67 | 1.18 | 14       |

\* Análisis de suelos realizado 6 meses después de aplicada la cal.  
 \*\* Dosis en los dos tratamientos = 2 t/ha.  
 \*\*\* Mezcla física de 85% de CaCO<sub>3</sub> + 15% de MgO.



**Foto 34. Deficiencia de magnesio en palmito en Ultisoles de Costa Rica.**

prima para la fabricación de fertilizantes compuestos, pero puede ser también usado directamente en el suelo como fuente de Mg. Sin embargo, para que el MgO sea efectivo son indispensables dos condiciones, que el suelo sea ácido y que el material sea finamente molido. Esto se debe a que el MgO es insoluble en agua y las reacciones ocurren solamente si se aplica material muy fino en un ambiente ácido. Estudios conducidos en suelos ácidos de Costa Rica han



**Foto 35. Deficiencia de magnesio en teca creciendo en suelos ácidos.**

demostrado el efecto benéfico de la mezcla de cal con MgO en los cultivos de naranja (Tabla 22) y palmito (Tabla 32).

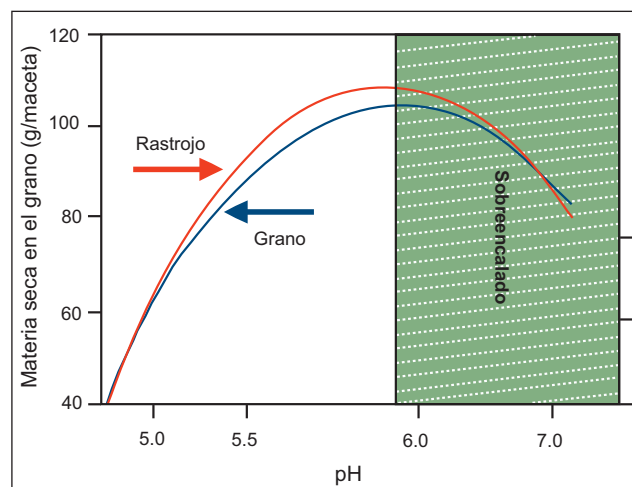
## PROBLEMAS DE SOBREENCALADO

Por muchos años se consideró que en general el pH óptimo para la producción de cultivos estaba entre 6.5 y 7.0. Esto es cierto en Mollisoles, Vertisoles y ciertos

Alfisoles (suelos dominados por esmectitas). Investigación conducida en suelos tropicales 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 al causar deterioro de la estructura e inducir deficiencias de Zn, B, y Mn. Un ejemplo de sobreencalado en un Ultisol de Hawai se presenta en la Figura 8.

El uso de cantidades excesivas de cal puede dispersar los coloides al afectar la agregación de las partículas del suelo. El sobreencalado promueve la dispersión de los agregados del suelo debido a que produce cambios en la superficie de los coloides que llevan a que dominen las fuerzas de repulsión entre partículas. Esto altera las condiciones físicas del suelo haciendo que aparezcan costras en la superficie, que se taponen los

poros del suelo y que exista una muy lenta infiltración (Roth et al., 1986; Haynes y Naidu, 1998). Todo esto afecta considerablemente los cultivos.



**Figura 8. Efecto del sobreencalado en el rendimiento de maíz en un Ultisol de Hawai (Sánchez, 1976).**

## USO DEL YESO AGRICOLA COMO ENMIENDA

### INTRODUCCION

El yeso agrícola o sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) es un producto natural que se encuentra en numerosos yacimientos en todo el mundo, la mayoría de ellos provenientes de rocas de evaporitas sedimentarias. El yeso también se obtiene como subproducto de los procesos industriales de producción del ácido fosfórico, en la fabricación de fertilizantes fosfatados como el superfosfato triple y los fosfatos amónicos. En este proceso la roca fosfórica es atacada con ácido sulfúrico obteniéndose ácido fosfórico y yeso de acuerdo a las siguientes reacciones:



El yeso se utiliza principalmente en la fabricación de tiza y como aditivo en la industria del cemento. El yeso también se utiliza en agricultura como enmienda y mejorador del suelo.

A pesar de su poca solubilidad en agua, el yeso puede reaccionar a mediano plazo en el suelo y constituir una fuente de Ca y S para los cultivos. Su composición varía de 17 a 20% Ca y de 14 a 18% de azufre (S).

### USO DE YESO EN SUELOS ACIDOS

Es interesante el uso del yeso agrícola como enmienda en suelos ácidos. En realidad, el yeso no cambia la acidez del suelo directamente a tal punto que las aplicaciones de yeso al suelo prácticamente no cambian el pH. Los beneficios de la aplicación de yeso en suelos ácidos se derivan de su efecto como mejorador del ambiente radicular, especialmente en la presencia de subsuelos fuertemente ácidos (Alcarde, 1988; Chaves, 1991; Malavolta, 1992).

Cuando se encala el suelo, la acción de la cal se confina a la sección del suelo donde se incorporó el material. Si el suelo es ácido hasta cierta profundidad en el perfil, más allá de la capa arable, las capas inferiores continuarán ácidas porque no se benefician del encalado. Esto ocurre porque el ion  $\text{CO}_3^{2-}$  se disipa como  $\text{CO}_2$  en la zona de aplicación. De esta forma, tampoco el  $\text{Ca}^{2+}$  puede moverse a través del perfil.

El  $\text{Ca}^{2+}$  tiene muchas funciones en la planta y por esta

razón se necesitan niveles relativamente altos de este nutriente en el suelo para asegurar el crecimiento de las raíces. La absorción iónica de nutrientes de la solución del suelo por las raíces depende de la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$ , que mantiene la integridad funcional de la membrana citoplasmática lo que garantiza el proceso metabólico de absorción de nutrientes. Como ya se ha discutido anteriormente, la presencia de  $\text{Al}^{3+}$  en la solución del suelo causa agudos problemas al cultivo. El  $\text{Al}^{3+}$  dificulta la división y crecimiento celular lo que inhibe el desarrollo de las raíces, promoviendo de esta forma raíces cortas y atrofiadas que no pueden absorber de la solución del suelo iones como  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  o  $\text{NO}_3^-$ .

Condiciones de bajo contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  y alto contenido de  $\text{Al}^{3+}$  generalmente se presentan en suelos tropicales ácidos, y en muchos casos, estas condiciones prevalecen en el subsuelo donde son difíciles de corregir con aplicaciones de cal.

La utilización de yeso promueve el desarrollo de condiciones favorables para el crecimiento vigoroso del sistema radicular en capas subsuperficiales del suelo. Un sistema radicular que crece vigorosamente a profundidad aprovecha mejor el agua disponible ya que las capas inferiores del suelo conservan mejor la humedad. De esta forma, el cultivo resiste mejor las épocas secas. Además, un sistema radicular vigoroso y profundo explora mejor el perfil del suelo aprovechando mejor los nutrientes. Todo esto se refleja por supuesto en un mejor rendimiento del cultivo.

Las reacciones químicas que se producen luego de la adición de yeso al suelo, y que conducen a la creación de condiciones favorables para el crecimiento radicular, se resumen a continuación:

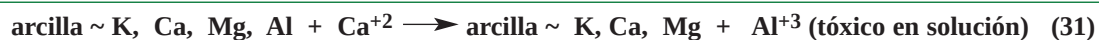
### Disolución y disociación del $\text{CaSO}_4$ en la superficie del suelo

Después de aplicarse el yeso ocurre la siguiente reacción que libera las especies que luego seguirán reaccionando en el suelo:



## Reacciones de intercambio y formación de pares iónicos

Como se observa la disociación produce  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$  como iones en la solución, pero además queda sin disociarse  $\text{CaSO}_4^0$  que se puede mover a través del perfil a capas inferiores. El  $\text{Ca}^{+2}$  puede reemplazar cationes en la fase de intercambio y liberar a la solución del suelo  $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ , etc. como se describe a continuación:



## Formación de pares iónicos

Los cationes resultantes de estas reacciones darán lugar a la formación de pares iónicos con el ion sulfato ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) de acuerdo a las siguientes ecuaciones:



## Lixiviación y disociación a profundidad

Los pares iónicos formados se mueven a capas más profundas del suelo donde pasan nuevamente por las reacciones de intercambio catiónico y por la formación de pares iónicos. Esto permite el enriquecimiento con cationes de las capas inferiores, pero fundamentalmente elimina el  $\text{Al}^{+3}$  al formar  $\text{AlSO}_4^+$  que no es tóxico.

Todas estas reacciones mejoran las condiciones químicas del suelo y promueven un mejor ambiente radicular en capas subsuperficiales lográndose que la planta tenga un mejor crecimiento y rendimiento gracias a una mejor utilización de agua y nutrientes. Estas condiciones no se logran con la aplicación de cal como se ilustra en las Figuras 9, 10 y 11.

Resumiendo, el yeso afecta diversos procesos en el suelo, algunos de ellos no muy claros. Estos son:

- Suministra Ca y S a las plantas
- Disminuye el nivel de aluminio intercambiable y su actividad
- Reduce la saturación de aluminio en el complejo de intercambio del suelo

- Incrementa el contenido de Ca y otros cationes en el subsuelo
- Aumenta el crecimiento y la profundidad de raíces
- Mejora la estructura del suelo
- Reduce el Na en suelos donde se ha acumulado este elemento
- Aumenta la lixiviación de cationes del subsuelo (efecto negativo)

## Cantidad de yeso a utilizarse

El yeso tiene una solubilidad de 2.5 g/litro pero diversos factores pueden alterar ese valor en el suelo, especialmente la presencia de cationes y la formación de pares iónicos. La constante de solubilidad del yeso ( $K_s$ ) es igual a  $2.44 \times 10^{-5}$ .

No es necesario incorporar el yeso debido a la facilidad como desciende por el perfil del suelo después de iniciarse las reacciones correspondientes. Es suficiente con aplicar al voleo en el suelo preparado para la nueva siembra o en la superficie del suelo donde crecen cultivos perennes.

No se dispone de criterios seguros para recomendar la aplicación de yeso por falta de información experimental en diversos suelos y por la complejidad de las reacciones químicas que el yeso desata en el suelo. Sin embargo, se han desarrollado diversos criterios que se ajustan principalmente a suelos tropicales viejos (Ultisoles y Oxisoles). Estos criterios son (Malavolta, 1992):

$$\text{Yeso (t/ha)} = (0.4 \times \text{CICE} - \text{meq Ca/100 g}) \times 2.5 \quad (35)$$

$$\text{Yeso (t/ha)} = (0.2 \times \text{CICE} - \text{meq Al/100 g}) \times 2.5 \quad (36)$$

Por otro lado, se considera que para elevar el Ca intercambiable en el suelo en 1 meq/100 g o para disminuir el Al en la misma cantidad se debe aplicar 2.5 t/ha de yeso.

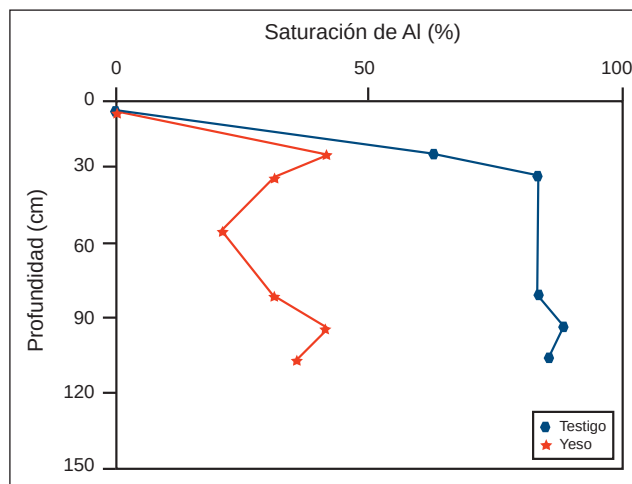
De igual manera, la textura parece ser una buena base para determinar la cantidad de yeso a aplicarse como se indica a continuación (Vitti et al., 1996).

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| Suelos arenosos (<15% de arcilla):       | 0.5 ton/ha |
| Suelos francos (15-35% de arcilla):      | 1.0 ton/ha |
| Suelos arcillosos (36-60% de arcilla):   | 1.5 ton/ha |
| Suelos muy arcillosos (>60% de arcilla): | 2.0 ton/ha |

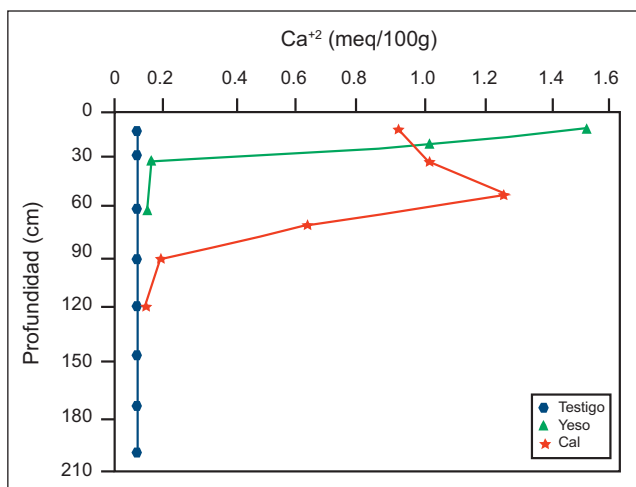
Para concluir, es necesario indicar que se debe ser prudente con la aplicación de yeso al suelo por el potencial peligro de lixiviar cationes a través de la formación de pares iónicos.

El yeso es un buen complemento al encalado en suelos ácidos. La aplicación conjunta de yeso y cal ayuda a reducir los problemas de acidez en el subsuelo, en un período de tiempo menor al que se logra con la aplicación exclusiva de cal. La aplicación simultánea de yeso y cal se puede hacer mediante la mezcla física de ambos materiales directamente en la finca, o a través de un proceso industrial. Normalmente, la proporción de la mezcla es de 70 a 75% de carbonato de calcio o cal dolomita, y de 25 a 30% de yeso. Esto permite la aplicación de las dos enmiendas en una sola

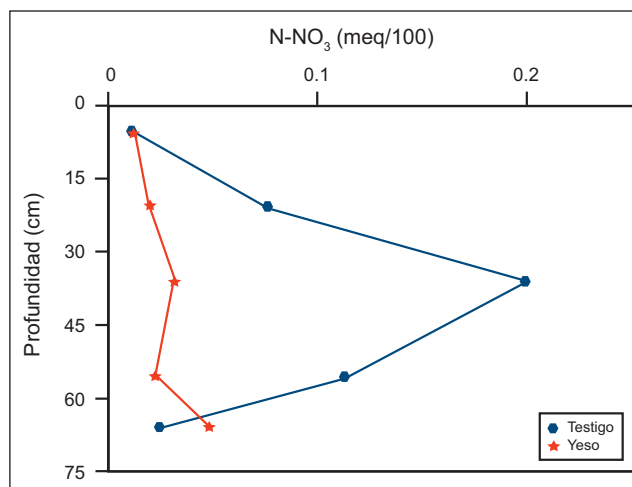
operación. No es conveniente utilizar dosis excesivas de yeso en suelos ácidos bajos en Ca y Mg, debido a que se puede incrementar la lixiviación de bases y disminuir la fertilidad de los suelos.



**Figura 10. Efecto de la aplicación de yeso en la saturación de  $Al^{+3}$  en el perfil del suelo (Malavolta, 1992).**



**Figura 9. Efecto de la aplicación de yeso y cal en el distribución de  $Ca^{+2}$  en el perfil del suelo (Malavolta, 1992).**



**Figura 11. La aplicación de yeso permitió un mejor crecimiento radicular del maíz que utilizó adecuadamente el  $NO_3^-$  presente en el suelo (Malavolta, 1992).**

## BIBLIOGRAFIA

- Alcarde, J.C. 1988. Contraditória, confusa e polémica: é a situacao do uso do gesso na agricultura. *Informacoes Agronómicas*. POTAFOS 41:1-3
- Alcarde, J.C. 1992. Corretivos da acidez dos solos: características e interpretacoes técnicas. ANDA, Sao Paulo, Brasil. *Boletim Técnico* N° 6. 26 p.
- Alvarado, A., G. Acosta, y E. Ayala. 1989. La acidez del suelo y el encalado de cultivos anuales en el Chapare. *Revista de Agricultura* (Bolivia) No. 14: 17-24.
- Barber, S. 1984. Liming materials and practices. In *Soil Acidity and Liming*. Ed. por F. Adams, Wisconsin, ASA p. 171 - 209.
- Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Universidad de Costa Rica. 86 p.
- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica. ACCS. 57 p.
- Brady, N. 1976. Naturaleza y propiedades de los suelos. Editorial Hispano América. México.
- Carballo, L., Molina, E. 1993. Caracterización física y química de materiales de encalado en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 17(2):105-110.
- Caudle, N. 1991. Groundworks 1. Managing soil Acidity. *Tropsoils*, North Carolina State University, Raleigh.
- Chaves, M. 1991. Características y uso potencial del yeso en la agricultura costarricense. *Revista Colegio de Ingenieros Agrónomos*. (Costa Rica) N° 7:18-20.
- Chaves, M.A. 1993a. Importancia de las características de calidad de los correctivos de acidez del suelo: desarrollo de un ejemplo práctico para su cálculo. San José, Costa Rica. DIECA. 41 p.
- Chaves, M.A. 1993b. Determinación de la calidad de 13 materiales de uso comercial empleados para el encalado de los suelos en Costa Rica a través de su valoración fisicoquímica. In: IX Congreso Agronómico Nacional. Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica. Vol. II. 111.
- Chaves, M.A., y A. Alvarado. 1994. Manejo de la fertilización en plantaciones de caña de azúcar en Andisoles de ladera de Costa Rica. In XV Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo. Vol. 7a, Comisión VI. P. 353-372.
- Cochrane, T., J. Salinas, y P. Sánchez. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compesate crops aluminium tolerance. *Tropical Agriculture* 57(2):133-140.
- Crovetto, C. 1996. Stubble over the soil. American Society of Agronomy. Madison W.
- 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.
- Espinosa, J. 1994. Acidez y encalado de los suelos. En: F. Silva M. (ed.). *Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá Colombia.
- Fox, R. L. 1980. Soil with variable charge: Agronomic and fertility aspects. In Theng, G. (ed). *Soils with variable charge*. Palmerston North, New Zeland Society of Soil Science.
- Fernandes de Sequeira, O. J., E. Erhard, G. Tassinari, I. Anghinoni, J. Patella, M. Tedesco, M. Milan, e P. Ernani. 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.
- Gambaudo, S., y H. Fontanetto. 1995. Corrección de la acidez edáfica en el centro de Santa Fe, Argentina. INTA, EEA Rafaela. Santa Fe, Argentina. Documento de trabajo.
- Gambaudo, S., y H. Fontanetto. 1997. Respuesta del cultivo de soja al encalado. INTA, Centro Regional Santa Fe, EEA Rafaela. Publicación Miscelánea N° 82: 109-110.
- Guillman, G. P. 1979. A proposed method for the measurement of exchange properties on highly weathered soils. *Aust. J. Soil Res.* 17:129-139.
- Guillman, G. P., and R. L. Fox. 1980. Increases in the cation exchange capacity of variable charge soils following superphosphate applications. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:934-938
- Guillman, 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.
- Gutiérrez, R. 1992. Fertilización biológica y biotecnología. *Memorias del seminario "Fertilización Balanceada de Cultivos"*. PALMAVEN-INPOFOS. Maracay, Venezuela.
- Haynes, R.J., and R. Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51: 123-137.

- Hicks, D.R., R.M. Vanden, and Z.Q. Fore. 1997. Analysis and practical use of information from on farm strip trials. *Better Crops* 81:18-21.
- Kamprath, E.J. 1984. Crop response to lime on soils in the tropics. In *Soil Acidity and Liming*. Ed. por F. Adams, Wisconsin, ASA. p. 349-369.
- Kamprath, 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.
- Landers, J. 1994. Adubacao e correcao do solo sob plantio direto. Fascículo de Experiencias de Plantio Direto no Cerrado. Associacao de Plantio Direto no Cerrado. Goiania, Brasil.
- Lazcano, I. 1999. Nuevos criterios en la recomendación de fertilizantes en sistemas de alta productividad agrícola en México. *Memorias de la décima Conferencia Fertilizantes Latino América*. Palm Beach. Florida.
- León, L. A. 1998. Efecto de la aplicación de dolomita y dosis de fósforo en el rendimiento del maíz en dos Oxisoles de Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 29:120-125.
- Malavolta, E. 1992. Reacción del suelo y el café. *Memorias del seminario "Fertilización y Nutrición del Café"*. ANACAFE-INPOFOS. Guatemala.
- Malavolta, E. 1992. O gesso agrícola no ambiente e na nutricao da planta - perguntas e respostas. *Memorias del II Seminario Sobre o Uso do Gesso na Agricultura*, Instituto Brasileiro do Fosfato. p 41-66.
- Malavolta, E., A. Lopes, y L. Guilherme. 1991. Fertilizantes, correctivos y productividad. *Memorias de simposio "El Suelo y la Productividad"*. Itaguai, Río de Janeiro.
- Malavolta, E. 1993. Nutricao mineral e adubacao do cafeeiro. *Colheitas economicas máximas*. Sao Paulo, Brasil, Ed. Ceres. 210 p.
- Mathers, S.J., D. Harrison, y F. Alvarado. 1991. An assessment of the potential of the Barra Honda limestone, Guanacaste Province, Costa Rica. *Proyecto Anglocostarricense de minerales industriales*. RECOPE. San José, Costa Rica. BGS Technical Report . WC/90/37. 29 p.
- Mite, F., M. Carrilo y J. Espinosa. 1998. Fertilizer use efficiency in oil palm is increased under irrigation in Ecuador. *Better Crops International* 84: 25.27.
- Molina, E. 1992. El magnesio en la nutrición del café. *Revista Agroindustria* 22:12-13.
- Name, B. 1992. Dinámica de fósforo en un Ultisol de Panamá. *Reporte del ciclo 1991-1992*. Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. Divisa, Panamá.
- Nelson, L. 1999. Estadística en la investigación de uso de fertilizantes. INPOFOS, Quito, Ecuador.
- Nicholaides, J.J. 1993. Liming materials: origin, composition, use and effects. In *CRC Handbook of Nutritional Supplements*, Vol. II. Ed. por M. Recheigl, Florida. CRC Press. p. 337-366.
- Ortega, L., C. Henriquez, E. Molina, y L. Angulo. 1996. Manejo de la fertilización con Ca, Mg y K para la producción de palmito de pejibaye. In: *X Congreso Agronómico Nacional*. Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica. Vol. III. p. 164.
- 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 Zeland Society of Soil Science.
- Parfitt, R. L., and T. Henmi. 1980. Structure of some allophanes from New Zeland. *Clays Clay Min.* 28:285-294.
- Pottker, D., e J.R. Ben. 1998. Calagem para uma rotacao de culturas no sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:675-684.
- Raij, B. Von. 1991. Fertilidade do solo e adubacao. Editora agronómica Ceres Ltda. Sao Paulo, Brasil.
- Raij, B. van. 1991. Fertilidade do solo e adubacao. Sao Paulo, Piracicaba, Brasil. POTAFOS. 343 p.
- Raij, B. Von. 1992. Reaciones de gesso em solos ácidos. *Memorias del II Seminario Sobre o Uso do Gesso na Agricultura*, Instituto Brasileiro do Fosfato. p 105-119.
- Ramírez, J. 1997. Fertilización de café a plena exposición solar y con sombra regulada. In *XVIII Simposio Latinoamericano de Caficultura*. ICAFE-IICA-PROMECAFE, San José, Costa Rica. p. 183-190.
- Rojas, A., E. Molina, y F. Morales. 1996. Evaluación agronómica de tres fuentes de cal en el cultivo de naranja. In: *X Congreso Agronómico Nacional*. Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica. Vol. III. p. 143.

- Roth, C.H., M.A. Pavan, J.C.D. Chaves, B. Neyer, e H.G. Frede. 1986. Efeitos das aplicacoes de calcario e gesso sobre a estabilidade de agregados e infiltrabilidade de água em un Latossolo Roxo cultivado com cafeeiros. *Rev. Bras. Ci. Solo* 10:163-166.
- Salas, R., E. Molina, E. y D. Bouldin. 1996. Lime response on tanier in an Ultisol of Costa Rica. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 27(9/10):2477-2484.
- Sánchez, P. 1976. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley & Sons. New York.
- Sánchez, L.F. 1987. Respuesta de varios cultivos a la aplicación de enmiendas en Oxisoles y Ultisoles de los Llanos Orientales. *Memorias del Simposium Fuentes Inorgánicas Naturales en el Manejo de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá, Colombia.
- Sánchez, L.F., y E.J. Owen. 1994. Fertilidad de los suelos y fertilización de cultivos en los Llanos Orientales. En: F. Silva M. (ed.). *Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Bogotá Colombia.
- Shoemaker, H.E., E. O. Mclean, and P.F. Pratt. 1961. Buffer methods for determining lime requirements of soils with appreciable amounts of exchangeable aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25:247-277.
- Silva, A.A., F.R. Vale, L.A. Fernandes, A.E. Furtini Neto, e J.A. Muniz. 1998. Efeitos de relacoes  $\text{CaSO}_4/\text{CaCO}_3$  na mobilidade de nutrientes no solo e no crescimento do algodoeiro. *R. Bras. C. Solo*, 22:451-457.
- Tisdale, S., W. Nelson, J. Beaton, J. Havlin. 1993. *Soil fertility and Fertilizers*. 5 ed. Columbus USA, Mac Millan Publishing,.
- 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.
- Valencia, A.G., P. I. F. Carrillo, & H. I. L. Estrada. 1990. La fertilización del cafetal según el análisis de suelos, In: *Conferencias Conmemorativas 50 años de Cenicafé 1938-1988*, Cenicafé, (Colombia), pp.97-103.
- Valencia, A. G. 1988. Manual de nutrición y fertilización del café. INPOFOS-Quito.
- Vitti, G.C. et al. 1996. Técnicas de utilizacao de calcario e gesso na cultura dos citros. In: *Anais IV Seminario Internacional de citros: nutricao e adubacao*, Sao Paulo, Brasil. Fundacao Cargill. p. 131-160.
- Yost, R., T.J. Smyth, S. Itoga y Zhi-cheng Li. 1990. Uso de sistemas de apoyo-decisión para hacer recomendaciones de cal y fósforo. In: *Manejo de suelos tropicales en Latinoamérica*, ed. por T.J. Smith et al. San José, Costa Rica, North Carolina State University. P. 177-185.
- Zapata, R. 1996. Especiación de aluminio extraído con KCl 1N. *Suelos Ecuatoriales* 26:97-101.

**Apéndice 1. Factores de conversión.**

| Para convertir<br>Columna 1 en 2<br>Multiplicar por | Columna 1                                      | Columna 2                                 | Para convertir<br>Columna 2 en 1<br>Multiplicar por |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>MEDIDAS DE LONGITUD</b>                          |                                                |                                           |                                                     |
| 1.094                                               | metro (m)                                      | yarda                                     | 0.914                                               |
| 1.19                                                | metro (m)                                      | vara                                      | 0.84                                                |
| 3.28                                                | metro (m)                                      | pié                                       | 0.304                                               |
| 106                                                 | metro (m)                                      | micrón ( $\mu$ )                          | $10^{-6}$                                           |
| 109                                                 | metro (m)                                      | nanómetro (nm)                            | $10^{-9}$                                           |
| 1010                                                | metro (m)                                      | angstrom ( $\text{\AA}$ )                 | $10^{-10}$                                          |
| <b>MEDIDAS DE SUPERFICIE</b>                        |                                                |                                           |                                                     |
| 2.496                                               | hectárea (ha)                                  | acre                                      | 0.405                                               |
| 10000                                               | hectárea (ha)                                  | metro cuadrado ( $\text{m}^2$ )           | $10^{-4}$                                           |
| $3.86 \times 10^{-3}$                               | hectárea (ha)                                  | sección                                   | 259                                                 |
| 0.699                                               | hectárea (ha)                                  | manzana                                   | 1.43                                                |
| <b>MEDIDAS DE VOLUMEN</b>                           |                                                |                                           |                                                     |
| 1000                                                | metro cúbico ( $\text{m}^3$ )                  | litro (L)                                 | $10^{-3}$                                           |
| $6.10 \times 10^4$                                  | metro cúbico ( $\text{m}^3$ )                  | pulgada cúbica                            | $1.64 \times 10^{-5}$                               |
| 0.265                                               | Litro (L)                                      | galón                                     | 3.78                                                |
| 33.78                                               | Litro (L)                                      | onza líquida                              | $2.96 \times 10^{-2}$                               |
| 2.114                                               | Litro (L)                                      | pinta líquida                             | 0.473                                               |
| <b>MEDIDAS DE PESO</b>                              |                                                |                                           |                                                     |
| 1                                                   | megagramo (Mg)                                 | tonelada métrica (ton)                    | 1                                                   |
| 1000                                                | megagramo (Mg)                                 | kilogramo (kg)                            | $10^{-3}$                                           |
| 2.205                                               | kilogramo (kg)                                 | libra (lb)                                | 0.454                                               |
| 1                                                   | kilogramo (kg)                                 | arroba (@)                                | 12.5                                                |
| 0.022                                               | kilogramo (kg)                                 | quintal (qq)                              | 45.36                                               |
| $3.9 \times 10^{-3}$                                | kilogramo (kg)                                 | fanega                                    | 255                                                 |
| <b>MEDIDAS DE CONCENTRACION</b>                     |                                                |                                           |                                                     |
| 1                                                   | centimoles de carga/kilogramos<br>[cmol(+)/kg] | miliequivalentes/100<br>gramos (meq/100g) | 1                                                   |
| 0.1                                                 | gramos/kilogramos (g/kg)                       | porcentaje (%)                            | 10                                                  |
| 1                                                   | miligramos/kilogramos (mg/kg)                  | partes por millón (ppm)                   | 1                                                   |
| <b>CONVERSION DE NUTRIENTES</b>                     |                                                |                                           |                                                     |
| 0.4364                                              | $\text{P}_2\text{O}_5$                         | P                                         | 2.2914                                              |
| 0.7242                                              | $\text{H}_3\text{PO}_4$                        | P                                         | 1.3808                                              |
| 0.8302                                              | $\text{K}_2\text{O}$                           | K                                         | 1.2046                                              |
| 0.7147                                              | CaO                                            | Ca                                        | 1.3992                                              |
| 0.6031                                              | MgO                                            | Mg                                        | 1.6581                                              |
| 0.3334                                              | $\text{SO}_4$                                  | S                                         | 2.9959                                              |
| 0.3106                                              | $\text{B}_2\text{O}_3$                         | B                                         | 3.2199                                              |
| 0.7988                                              | CuO                                            | Cu                                        | 1.2519                                              |
| 0.6994                                              | $\text{Fe}_2\text{O}_3$                        | Fe                                        | 1.4298                                              |
| 0.7745                                              | MnO                                            | Mn                                        | 1.2912                                              |
| 0.6665                                              | MoO                                            | Mo                                        | 1.5004                                              |
| 0.8033                                              | ZnO                                            | Zn                                        | 1.2448                                              |