

ACIDEZ DE SUELO Y ENCALADO

Ing. Eloy Molina, M. Sc.
Centro de Investigaciones Agronómicas
Universidad de Costa Rica

Tomado de: Molina, E. 1998. Encalado para la corrección de la acidez del suelo, ACCS, San José, Costa Rica. 45 p.

1. INTRODUCCION

La acidez de los suelos constituye un problema de importancia en la producción agrícola de Costa Rica. La acidez afecta de una forma muy particular y determinante algunas de las características químicas y biológicas del suelo, de modo que en general, reduce el crecimiento de las plantas, ocasiona la disminución de la disponibilidad de algunos nutrimentos como calcio, magnesio, potasio y fósforo; y favorece la proliferación de elementos tóxicos para las plantas como el aluminio y el manganeso. El encalado junto con la siembra de especies tolerantes constituyen las prácticas más apropiadas y económicas para corregir los problemas de acidez. Sin embargo, es común encontrar que los criterios utilizados para la aplicación de los materiales de encalado existentes en el mercado, no cumplen los requisitos mínimos de calidad para asegurar el éxito de su empleo.

1. DIAGNÓSTICO DE ACIDEZ DE SUELOS

El análisis de suelos es una de las herramientas más útiles para el diagnóstico de la fertilidad de los suelos. En el caso de la acidez, mediante este procedimiento es posible detectar su presencia y a su vez generar una recomendación para solventar adecuadamente el problema. La acidez o aluminio intercambiable se determina mediante la extracción del suelo con una sal neutra no tamponada, tal como el KCl 1N, y la titulación del extracto con una base. Esta fracción constituye el aluminio e hidrógeno intercambiable y el de la solución del suelo que pueden perjudicar el crecimiento de las plantas. La mayor parte de la acidez en los suelos tropicales (excluyendo los suelos orgánicos) proviene del aluminio, por lo que generalmente se habla de acidez intercambiable ($Al^{+3} + H^+$) y aluminio intercambiable como si fueran sinónimos.

La acidez intercambiable se expresa en meq/100 mL o cmol(+)/L, y se considera que un valor > 0.5 cmol(+)/L podría ser problemático para los cultivos.

Otro parámetro de diagnóstico, quizás el más útil, es el % de saturación de acidez, el cual se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Saturación de acidez} = \frac{\text{acidez (cmol (+)/L)}}{\text{acidez + Ca + Mg + K (cmol(+)/L)}} \times 100$$

La saturación de acidez es una medida del % del complejo de intercambio catiónico que está ocupado por aluminio e hidrógeno. El valor del % de saturación de aluminio o acidez intercambiable es el mejor criterio para diagnosticar problemas de acidez. Cada cultivo, variedad o cultivar tiene su grado de tolerancia a la acidez, lo cual depende de las características genéticas de la planta. Sin embargo, en términos generales se puede indicar que casi ningún cultivo soporta más de 60% de saturación de acidez, y el valor deseable para la mayoría de las plantas oscila entre 10 y 25%.

El pH del suelo está directamente relacionado con el % de saturación de acidez, ya que el aluminio intercambiable precipita entre pH 5.5 y 6.0. Cuando el pH es menor de 5.5 el aluminio se solubiliza, y por lo tanto, resulta más abundante y tóxico para las plantas.

La suma de bases (Ca + Mg + K) es también importante, ya que se considera que un valor inferior a 5 cmol(+)/L puede llegar a disminuir el rendimiento de los cultivos.

En síntesis, se puede indicar que los problemas de acidez aumentan cuando se presentan las siguientes condiciones en el suelo:

- pH < 5.5
- Acidez o aluminio intercambiable > 0.5 cmol(+)/L
- Suma de bases (Ca + Mg + K) < 5 cmol(+)/L
- Saturación de acidez >20%

El criterio práctico que domina en la actualidad es utilizar una dosis de cal que reduzca el % de saturación de acidez del suelo a un nivel que sea tolerable por el cultivo, de acuerdo con alguna de las siguientes fórmulas propuestas para cuantificar las dosis:

- Cochrane, Salinas y Sánchez (1980)

$$\text{ton CaCO}_3/\text{ha} = \frac{1.8 (\text{Al} - \text{RAS}) (\text{C I C E})}{100}$$

Al = % de saturación de acidez existente en el suelo

RAS = % de saturación de acidez deseado

CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva

- Van Raij (1991)

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

V1 = % de saturación de bases que presenta el suelo

V2 = % de saturación de bases deseado

CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva

f = 100/PRNT

PRNT = Poder Relativo de Neutralización Total

PRNT = Equivalente Químico x Eficiencia Granulométrica/100

c) Modificación

$$\text{ton CaCO}_3/\text{ha} = \frac{1.5 (\text{Al} - \text{RAS}) (\text{CICE})}{100} \times f$$

El valor de 1.5 es para neutralizar el Al no intercambiable, y para hacer correcciones de peso/volumen para ajustar a una profundidad de incorporación de 15 cm (Yost et al., 1991).

La tolerancia a la acidez del suelo es muy variable entre cultivos, y dentro de una misma especie existen diferencias notables entre variedades. Algunos cultivos desarrollados originalmente en suelos calcáreos, como el algodón, sorgo y alfalfa, son susceptibles a niveles de 10 a 20% de saturación aluminica (Bertsch 1995), mientras que otros que han crecido en ambientes más silvestres son altamente tolerantes.

En el Cuadro 1 se presentan los valores de saturación de aluminio tolerados por algunos cultivos.

Cuadro 1. Porcentaje de saturación de Al tolerado por algunos cultivos en suelos ácidos.

Cultivo	% de Saturación de Al tolerado			% de Sat de Al recomendado (RAS)
	Alto	Medio	Bajo	
Arroz ¹	X	X	X	
Maíz		40		25
Sorgo			15	<20
Trigo			10	<10
Soya		X		<10
Frijol negro			X	<20
Maní		40		<25
Caupí	60			<40
Gandul	X			<40
Camote		30		<20
Papa		30		<20
Yuca	75			<60
Plátano		X		<25
Banano		X		<15
Coco		X		<30
Mango		X		<20
Cítricos		X		<20
Piña	X			<30
Pejibaye		X		<30
Cacao		X		<20
Palma aceitera		X		<15
Caña de azúcar		X		<20
Café		40		<25

1/ Existen variedades de todas las tolerancias

Fuente: Bertsch, 1995, modificado por Bertsch, 1997.

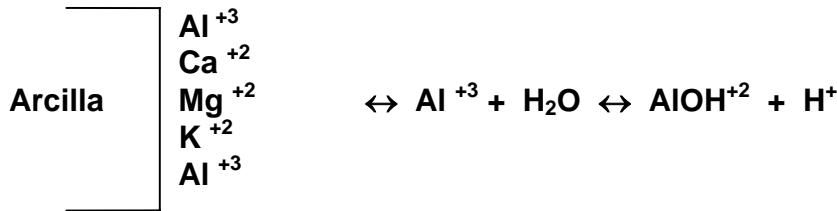
3. MATERIALES DE ENCALADO

El encalado consiste en la aplicación masiva de sales básicas con el objeto de neutralizar la acidez del suelo causada por hidrógeno y aluminio. Los productos que se utilizan como alcalinizantes o correctivos de la acidez del suelo son principalmente carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio y/o magnesio. Debido a su diferente naturaleza química, estos materiales presentan una capacidad de neutralización variable.

La acción neutralizante de los materiales de encalado no se debe en forma directa al calcio y el magnesio, sino más bien a las bases químicas a la cual están ligados estos cationes: CO_3^{-2} , OH^- , y SiO_3^{-2} . Los cationes reemplazan a los iones ácidos de las posiciones intercambiables y los ponen en solución, y al entrar en contacto la cal con el agua del suelo (Espinosa 1995) las sales básicas se disocian y generan cationes y OH^- . Los OH^- generados por los carbonatos, hidróxidos y silicatos son los que neutralizan la acidez del suelo al propiciar la precipitación del aluminio como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y la formación de agua. Las sales básicas de calcio y magnesio son muy abundantes en la naturaleza, y además estos dos elementos son esenciales para la nutrición de las plantas. Por este motivo constituyen los correctivos de acidez de mayor uso.

Las reacciones de la neutralización de la acidez del suelo se pueden ilustrar de la siguiente forma (Tisdale et al , 1993):

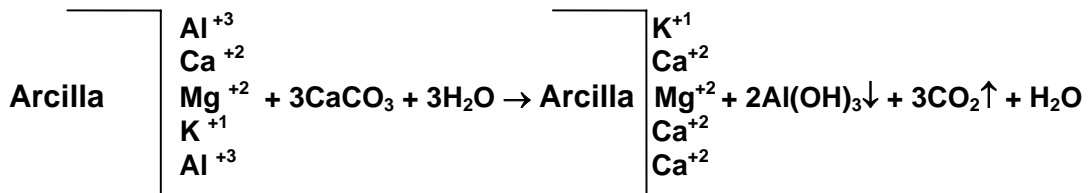
Suelo ácido



Material encalante



Reacción de encalado



En el esquema anterior se deduce que el Ca no interviene en la neutralización de la acidez, si no más bien es el anión CO_3^{-2} el que al hidrolizarse produce iones OH^- que neutralizan los iones H^+ provenientes de la hidrólisis del Al y precipitan al mismo Al.

El proceso reverso también puede ocurrir, debido a que los iones básicos como Ca, Mg y K pueden ser removidos del suelo por la absorción de las plantas o lixiviación, siendo reemplazados por Al. A medida que ocurre este proceso, se incrementa la actividad del H y se reduce el pH del suelo. La acidificación progresiva del suelo es favorecida cuando se utilizan dosis altas de fertilizantes nitrogenados o amoniacales.

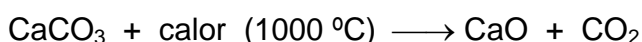
3.1 Fuentes.

a) Cal calcítica - CaCO_3

Es el material más utilizado para encalar los suelos. Está compuesto en su mayoría por carbonatos de calcio con muy poco magnesio. Se obtiene a partir de la roca caliza, roca calcárea o calcita, la cual es molida y pasada por mallas de diferentes tamaños para luego ser empacada en sacos de 23 ó 46 Kg. En su forma pura contiene 40% de Ca. Los materiales hechos de carbonato de calcio en el país varían entre 26 y 39% de Ca. Las rocas calizas no son puras, ya que pueden contener algunas impurezas que incluyen arcilla, hierro, arena y granos de limo.

b) Óxido de calcio CaO

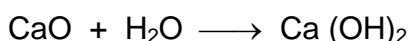
Es el producto obtenido de la calcinación total del carbonato de calcio a una temperatura aproximada a 1000 °C.



Se conoce como cal viva o cal quemada. Es un material muy cáustico y de manejo difícil porque puede causar quemaduras al contacto con la piel. Su velocidad de reacción es mayor que el carbonato debido a su mayor concentración de Ca (71% en su forma pura) y a que por ser un óxido, reacciona rápidamente al contacto con el agua provocando una fuerte reacción exotérmica y liberando iones OH^- . Se presenta normalmente como polvo bastante fino y su precio es más alto que el CaCO_3 .

c) Hidróxido de calcio Ca(OH)_2

Se obtiene a partir de la reacción del óxido de calcio con agua:



Se conoce como cal apagada o hidratada y es la forma en que se comercializa el CaO producido por calcinación. Luego de sacarlo del horno, lo hidratan y empaacan. Es un polvo blanco, con alto grado de solubilidad y de rápida reacción en el suelo. Presenta 54% de Ca en su forma pura. Es un material de mayor costo que el carbonato y con una reacción intermedia entre éste y el CaO en neutralizar la acidez del suelo.

d) Cal dolomítica - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

La dolomita pura contiene 21.6% de Ca y 13.1% de Mg. Aunque este material reacciona más lentamente en el suelo que el carbonato de calcio, tiene la ventaja de que suministra Mg, el cual es un elemento que con frecuencia se presenta también deficiente en suelos ácidos. Los materiales de encalado pueden clasificarse de acuerdo con su contenido de Mg en las categorías señaladas en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de las cales con base en su contenido de Mg.

Material	Mg -----%	MgO -----%	MgCO ₃ -----%
Calcítico	< 3	< 5	< 10
Magnesiano	3 - 7	5 - 12	10 - 25
Dolomítico	> 7	> 12	> 25

Se ha indicado que la dolomita reacciona más lentamente en el suelo que la cal calcítica, aunque no hay suficiente evidencia experimental que respalde esta afirmación.

En Centroamérica existen yacimientos de cal dolomítica en Honduras, Guatemala y Belice. Esto causa que su precio sea mucho más alto que el carbonato de calcio debido al costo del transporte o flete.

e) Magnesita

Es un producto a base de carbonato de magnesio (MgCO_3), que en su forma pura posee un contenido de Mg de 28.5%. Es una excelente fuente de magnesio.

f) Oxido de Magnesio - MgO

Este es un material compuesto sólo de Mg. Se le conoce también como Magox, y en su forma pura contiene 60% de Mg. Es fabricado a partir de la calcinación de la magnesita que produce MgO. Es una fuente excelente en suelos

ácidos con problemas de Mg. Su capacidad de neutralización de la acidez es mucho más elevada que la de otros materiales, pero dado que es un producto poco soluble en agua, debe ser molido finamente para que actúe como material neutralizante de la acidez del suelo.

g) Arcillas calcáreas

Son depósitos no consolidados de 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.

h) Escorias industriales

Son residuos de la industria del acero (escorias básicas) y de la fundición de hierro (escorias Thomas): ambos contienen silicatos de calcio (CaSiO_3) y silicatos de magnesio (MgSiO_3) y neutralizan la acidez del suelo a través de la hidrólisis del ión silicato (SiO_3). Su capacidad para neutralizar la acidez del suelo es similar al del carbonato de calcio.

i) Yeso

El yeso agrícola o sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es un subproducto de la industria del ácido fosfórico, el cual es necesario para la fabricación de fertilizantes fosfatados como triple superfosfato y fosfatos de amonio. La roca fosfórica es atacada con ácido sulfúrico para producir ácido fosfórico y yeso como subproducto:



El yeso también es obtenido de yacimientos o depósitos naturales de evaporitas sedimentaria (Shainberg et al., 1989). Su composición varía de 17 a 20% Ca y de 14 a 18% de S. Su aplicación superficial incrementa los contenidos de Ca y S, eleva la capacidad de intercambio catiónico y disminuye el nivel de aluminio intercambiable, su actividad, y su saturación en el complejo de intercambio del suelo (Chaves, 1991).

Los productos finales de la disolución del yeso son Ca^{+2} y SO_4^{-2} , que participan en reacciones de intercambio catiónico y aniónico, formación de complejos iónicos y precipitados. Estas reacciones modifican el nivel de fertilidad de suelos tropicales por la formación de un sistema dinámico con movimiento de iones y alteración de la solubilidad y disponibilidad de elementos para las plantas. El SO_4^{-2} también sufre reacciones de intercambio y adsorción y es susceptible a lixiviarse, arrastrando consigo a los cationes desplazados a la solución del suelo, hacia los horizontes subsuperficiales mediante la formación de pares iónicos neutros como CaSO_4 , MgSO_4 y K_2SO_4 . Esta lixiviación puede mejorar la fertilidad

del subsuelo, enriqueciéndolo con Ca, Mg, K y S, y estimulando un crecimiento más profundo de las raíces. Con ello las plantas son menos perjudicadas por déficit de humedad (Alcarde, 1988).

3.2 Calidad de materiales de encalado

Uno de los aspectos más importantes de considerar en la determinación de la eficiencia agronómica de un material de encalado es su calidad, la cual está fundamentada en los siguientes factores:

- pureza química y poder neutralizante
- forma química
- tamaño de partícula
- Poder de Neutralización Total

a) Pureza química

La pureza es una característica importante del material de encalado ya que permite conocer su composición química y expresarla como equivalente de carbonato de calcio. La composición molecular del material y la alta cantidad de contaminantes que contenga, tales como arcilla o minerales de Fe determinan este valor.

Todos los materiales difieren en su capacidad de neutralizar la acidez del suelo. Para conocer esta característica se utiliza el criterio de Efectividad química, Equivalente químico (EQ) o Poder de Neutralización, que se define como la capacidad de neutralizar la acidez que tiene un material con relación al carbonato de calcio puro, al cual se le asigna un valor de 100%. Para determinar el Poder de Neutralización se debe tomar una cantidad conocida del material y disolverla en una cantidad conocida de ácido, luego el exceso de ácido es titulado con una base. En el siguiente cuadro se presentan los valores de Equivalente de carbonato de calcio de varios materiales correctivos de acidez en su forma pura.

El cuadro revela que comparativamente con el carbonato de calcio puro, los óxidos e hidróxidos presentan una mayor capacidad potencial de neutralización. El óxido de magnesio constituye la forma química más eficiente para neutralizar la acidez del suelo. Como norma internacional se considera que los materiales con menos de 80% de equivalente de CaCO_3 (32% de Ca) son de baja calidad, de acuerdo con el criterio utilizado en Estados Unidos (Nicholaides 1983). La misma legislación norteamericana establece los siguientes contenidos mínimos: Óxido de calcio EQ = 140 (56% Ca); hidróxido de calcio EQ = 110 (44% Ca). La legislación brasileña acepta un valor mínimo de EQ = 67% para calcarios molidos (Alcarde, 1992).

Cuadro 3. Equivalentes químicos y composición química de diferentes enmiendas para el suelo.

MATERIAL	EQUIVALENTE QUIMICO	COMPOSICION PROMEDIO	% DE Ca y Mg
Carbonato de calcio	100	85 - 95% CaCO ₃	40
Dolomita	108	42% MgCO ₃ 52% CaCO ₃	12 21
Oxido de calcio	179	85% CaO	71
Hidróxido de calcio	138	65% Ca (OH) ₂	54
Hidróxido de magnesio	172	-	41
Carbonato de magnesio	119	-	28.5
Oxido de magnesio	248	60 - 90% MgO	60
Silicato de calcio	86	-	34.4
Silicato de magnesio	100	-	24

Cálculo del Equivalente Químico de un material:

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

$$\text{EQ CaCO}_3 = \% \text{CaCO}_3 \times 1 + \% \text{MgCO}_3 \times 1.19$$

Algunos factores de conversión para materiales de encalado que es importante tener a mano son:

- Ca x 1.4 = CaO
- Ca x 1.85 = Ca(OH)₂
- Ca x 2.5 = CaCO₃
- Mg x 1.67 = MgO
- Mg x 2.42 = Mg(OH)₂
- Mg x 3.5 = MgCO₃

b) Forma química

Con base en las diferentes formas químicas existentes, se presentan también diferentes capacidades de neutralización y reactividad. Los productos a base de carbonatos y silicatos neutralizan la acidez a través de sus bases químicas CO₃⁻² y SiO₃⁻², las cuales son débiles. En tanto que los óxidos reaccionan inmediatamente con el agua del suelo transformándose en hidróxidos,

por lo cual los óxidos e hidróxidos neutralizan la acidez a través de su base OH^- que es fuerte, por lo que son más efectivos.

c) Tamaño de partícula

La fineza de las partículas individuales de la cal determina su velocidad de reacción. Conforme se reduce el tamaño de la partícula de cualquier material, aumenta su área o superficie de contacto. Un volumen de 1 pulgada cúbica de cal sólo tiene 6 pulgadas cuadradas de superficie. Esa misma cantidad molida y colocada a través de un tamiz de malla 100, tiene 60 000 pulgadas cuadradas de área superficial. Entre más superficie específica tenga el material, más rápido se disolverá en el suelo.

Para estimar la eficiencia granulométrica de un material de encalado, se mide una cantidad determinada del material y se pasa por una secuencia de mallas o cribas de diferente tamaño, donde se obtiene la cantidad de material retenido en ellas, tal como se indica en el cuadro 4.

Los materiales que son retenidos en tamiz de 8 son inefectivos. Los que pasan este tamiz pero se retienen en tamiz 20 son 20% efectivos pero reaccionan muy poco. Los que pasan el tamiz 20 pero se retienen en el tamiz 60, son 60% efectivos y pueden reaccionar en un período de 10-18 meses, y todos los que pasan este último tamiz tienen 100% de efectividad y reaccionan entre 3 y 6 meses. La cal que pasa por un tamiz 80 es muy fina y 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.

Los requisitos mínimos de calidad 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).

Para el análisis de la Eficiencia granulométrica se pueden utilizar la siguiente secuencia de mallas : 8 ó 10, 20, 40, 60 y 80 mesh.

CUADRO 4. Composición química de algunos materiales de encalado en Costa Rica.

Procedencia	Material	Ca	Mg	CaCO ₃	MgCO ₃
		-----%-----			
Azul, Turrialba	CaCO ₃	39.7	0.2	99.3	0.7
Azul, Turrialba	CaCO ₃	38.9	0.2	97.3	0.7
Jesús María, Turrialba	CaCO ₃	38.4	0.7	96.0	2.5
Goldemberg, Nicoya	CaCO ₃	38.2	0.2	95.5	0.7
Goldemberg, Nicoya	CaCO ₃	38.2	0.2	95.5	0.7
Colorado, Abangares ¹	CaCO ₃	36.8	0.3	92.0	1.1
Derical, Esparza	CaCO ₃	38.9	0.3	97.3	1.1
Palmera, San Carlos	CaCO ₃	34.5	1.3	86.3	4.6
CEMPASA, Patarrá	CaCO ₃	32.8	0.2	82.0	0.7
CEMPASA, Patarrá	CaCO ₃	34.0	0.2	85.0	0.7
Cooperativa, Patarrá	CaCO ₃	32.5	0.4	81.3	1.4
Calfina, Patarrá	CaCO ₃	25.9	0.5	64.8	1.8
Industria de cal Patarrá	CaCO ₃	28.9	0.2	72.3	0.7
Fila de cal, Coto Brus	CaCO ₃	35.3	0.2	88.3	0.7
Guatemala - IMERCA	Dolomita	22.3	11.6	55.8	40.6
Guatemala	Dolomita	16.4	10.1	41.1	31.4
Belice	Dolomita	21.8	12.8	54.6	44.6
Honduras- INCAL	Dolomita	25.1	10.2	62.8	35.7
Honduras	Dolomita	27.5	6.4	68.8	22.4
CEMPASA, Patarrá	Cal + Magox	30.2	7.5	75.5	26.2

Fuente: Carballo y Molina, 1993.

1/ Mathers et al, 1991.

CUADRO 5. Eficiencia relativa granulométrica de la cal con base en el tamaño de malla.

Número de mallas	de Abertura de mallas (mm)	Eficiencia relativa (%)
< 8 mesh	> 2.36	0
8 - 20 mesh	2.36 - 0.85	20
20 - 40 mesh	0.85 - 0.42	40
20 - 60 mesh	0.85 - 0.25	60
> 60 mesh	< 0.25	100

d) Poder Relativo de Neutralización Total-PRNT

Representa un índice de eficiencia del material de encalado ya que considera la pureza química y la fineza. Se obtiene multiplicando la Eficiencia Granulométrica por el Equivalente Químico:

$$\text{PRNT} = \frac{\%EG \times \%EQ}{100}$$

El PRNT indica el % de Equivalente Químico o Poder de Neutralización de la cal que es capaz de reaccionar en un lapso de 3 meses. Por ejemplo, un material con EQ = 90%, y EG = 80%, tendrá un PRNT = (90 x 80)/100 = 72%. Esto quiere decir que el 72% del material reaccionará en un plazo de 3 meses y el restante 18% (90-72=18), reaccionará posteriormente. A mayor valor del PRNT, más reactivo es el material de encalado. Por ejemplo, Malavolta (1993) recomienda para café que la cal empleada tenga al menos un PRNT de 75%.

Al conocer este índice 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.

El valor de PRNT permite seleccionar la cal de acuerdo con su costo por unidad de PRNT:

$$\text{Costo por unidad de PRNT} = \frac{\text{Costo por sacco o TM de material}}{\text{PRNT del material}}$$

En el siguiente ejemplo se muestra la utilidad de considerar el costo por unidad de PRNT en un material de encalado.

Cuadro 6. Costo por unidad de PRNT en varios materiales de encalado

Material	EG	EQ	PRNT	Costo/sac o ¢	* Costo/PRNT ¢
A	62.2	82.7	51.4	700	13.62
B	56.5	91.6	51.8	1000	19.3
C	85.1	98.0	83.4	950	11.39

* Costo puesto en finca.

El cuadro 6 revela que la cal C, de mayor precio por saco, tiene el costo menor por unidad de PRNT debido a sus mejores características de calidad.

3.3 Método y época de aplicación

El método óptimo de aplicación es incorporar la cal en los primeros 15-20 cm de suelo, utilizando el arado o la rastra. De esta forma se logra la mezcla del material con la capa del suelo donde se concentran las raíces de la mayoría de los cultivos. Sin embargo, esto no puede siempre lograrse debido al costo que representa o a que el cultivo está ya establecido, como en el caso de los perennes, por lo que la cal se aplica entonces en la superficie. Se ha demostrado que las aplicaciones de cal incorporadas son más eficientes, especialmente si el suelo es arcilloso. La distribución es otro aspecto muy importante. Si la cal va a ser incorporada con arado, ésta debe distribuirse en forma uniforme en todo el terreno. 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. En cultivos perennes también resulta muy práctico incorporar un poco de cal en el hoyo de siembra antes de poner la planta, y otro poco en la rodaja. Normalmente, el suelo en la banda de fertilización tiende a ser más ácido debido al efecto residual de los fertilizantes nitrogenados, por lo que la aplicación de la cal en ese sitio es una medida eficaz.

En vista que la cal requiere de humedad para que reaccione, la época más apropiada para aplicarla es al inicio de las lluvias o un poco antes. En café es usual que la cal se agregue en los meses secos. 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 incorporada antes de sembrar. Una vez aplicada la cal, se debe esperar un tiempo prudencial (1 mes) para que reaccione antes de añadir el fertilizante. El contacto directo de la cal con fertilizantes nitrogenados amoniacales en la superficie del suelo puede favorecer la formación de carbonato de amonio, el cual a su vez se transforma en amoníaco y se pierde el N por volatilización.

También el contacto con fertilizantes fosfatados causa pérdidas del elemento por formación de fosfatos de calcio insolubles.

3.4 Efecto residual de la cal

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

a) Condiciones de clima y suelo

La alta temperatura y humedad, así como un valor alto del acidez, 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.

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 alta 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.

b) Naturaleza química del material

Los productos que forman bases fuertes como los óxidos e hidróxidos reaccionan más rápido, pero su efecto residual no es muy prolongado debido a que el Ca y/o Mg pueden ser lixiviados con el tiempo en climas muy lluviosos. Las bases débiles como los carbonatos, son de reacción más lenta y de mayor efecto residual.

c) 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 presentar pérdidas significativas por la acción de viento, además de mostrar aglutinación y adherencia de sus partículas, lo que dificulta su acción y distribución (Chaves, 1993a). 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.

d) 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 Ca. En cultivos perennes se puede utilizar cales con un efecto residual más prolongado (con un poco de material más grueso).

e) Intensidad de cultivo

Los terrenos intensamente cultivados y fertilizados con nitrógeno, son más susceptibles a acidificarse rápidamente. Se ha demostrado que en suelos ácidos como los Andisoles y Ultisoles, el abonamiento intensivo con fuentes amoniacales como sulfato de amonio, nitrato de amonio y urea, pueden incrementar los problemas de acidez a 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_4^+ por las bacterias del suelo. Además presentan mayor grado de acidificación potencial del suelo.

f) Dosis

Dosis muy bajas o que subestiman el contenido de acidez intercambiable del suelo no reducen la acidez de forma cuantificable y su efecto residual es casi nulo. Por ejemplo, la práctica corriente de aplicar 1 ton/ha de CaCO_3 en suelos ácidos cafetaleros, puede ser insuficiente en muchos casos, subestimando la magnitud de los problemas de acidez. En tal situación el análisis de suelos es la mejor herramienta para calcular la dosis de cal adecuada.

Algunos suelos pueden presentar un nivel de acidez intercambiable bajo, pero ser deficientes en Ca. En este caso, la aplicación de la cal es la forma más económica de suplir Ca como fertilizante, y el uso de una fórmula para calcular la dosis resulta innecesario, siendo más práctico agregar una cantidad moderada de cal (0.5-1 ton/ha) como fuente de Ca.

4. BIBLIOGRAFIA

ALCARDE, J.C. 1988. Contraditória, confusa e polemica : é a situacao do uso do gesso na agricultura. Informacoes Agronomicas. 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.

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. 157 p.

CARBALLO, L.; MOLINA, E. 1993. Caracterización física y química de materiales de encalado en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 17(2):105-110.

COCHRANE, T.; SALINAS, J.; SANCHEZ, P. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate crops aluminium tolerance. *Tropical Agriculture* 57(2):133-140.

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.

ESPINOSA, J. 1995. Acidez y encalado de los suelos. *Informaciones Agronómicas (INPOFOS)* 20:6-14.

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.

MALAVOLTA, E. 1993. Nutricao mineral e adubacao do cafeeiro. Colheitas economicas máximas. Sao Paulo, Brasil, Ed. Ceres. 210 p.

MATHERS, S.J.; HARRISON, D.; ALVARADO, F. 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.

MOLINA, E. 1992. El magnesio en la nutrición del café. *Revista Agroindustria* 22:12-13.

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.; HENRIQUEZ, C.; MOLINA, E.; ANGULO, L. 1996. Manejo de la fertilización con Ca, Mg y K para la producción de palmito de pejobaye. In: X Congreso Agronómico Nacional. Colegio de Ingenieros Agrónomos. San José, Costa Rica. Vol. III. p. 164.

RAIJ, B. VAN. 1991. Fertilidade do solo e adubacao. Sao Paulo, Piracicaba, Brasil. POTAFOS. 343 p.

ROJAS, A.; MOLINA, E.; MORALES, F. 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.

SALAS, R.; MOLINA, E.; BOULDIN, D. 1996. Lime response on tanager in an Ultisol of Costa Rica. Communications in Soil Science and Plant Analysis 27(9/10):2477-2484.

TISDALE, S.; NELSON, W.; BEATON, J.; HAVLIN, J. 1993. Soil fertility and Fertilizers. 5ed. Columbus USA, Mac Millan Publishing,.

VITTI, G.C. et al. 1996. Tecnicas 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. et al. 1991. Uso de sistemas de apoyo-decisión para hacer recomendaciones de cal y fósforo. In: Manejo de suelos tropicales en Latinoamérica, de. por T.J. Smith et al. San José, Costa Rica, North Carolina State University. P. 177-185.